

# La calorimétrie-II

## *le retour*

Vincent Boudry  
*LLR, École polytechnique*



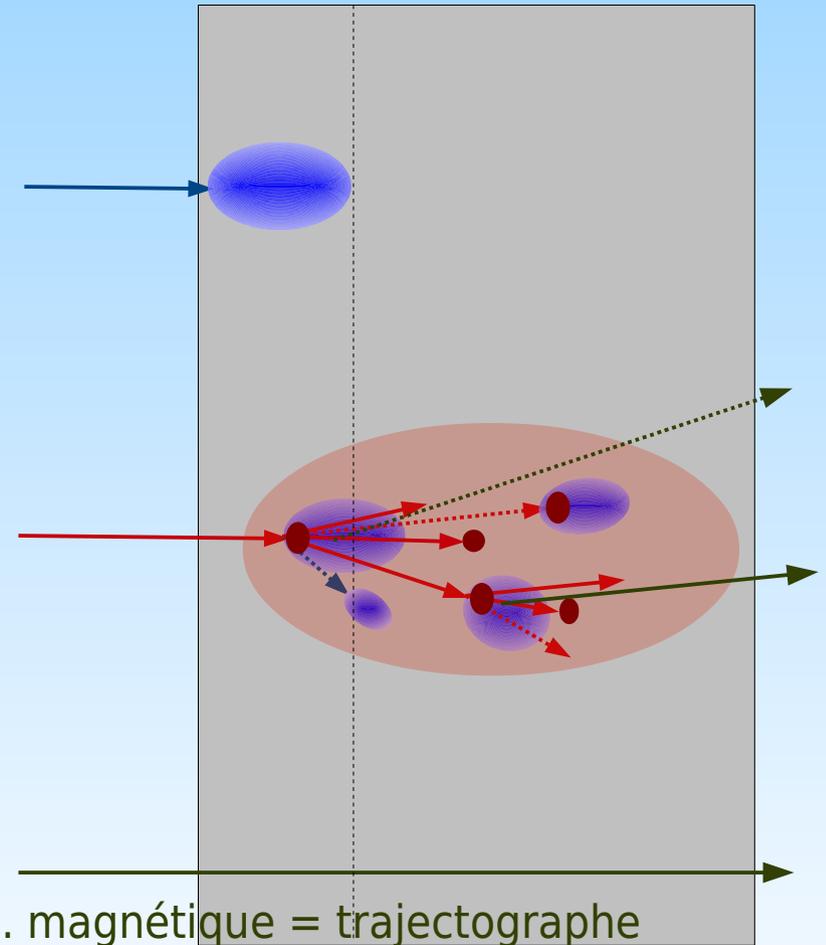
**École du détecteur à la mesure**  
**Fréjus, 12-18 mai 2013**

# Plan

- Introduction
    - ▶ Les interactions des particules dans la matière
      - ◆ interactions hadronique, réponse en temps, ...
      - ◆ Les belles gerbes
    - ▶ Principe de la mesure en calorimétrie
      - ◆ calorimétrie électromagnétique & hadronique
      - ◆ mesure de la performance
  - Techniques de détection
    - ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
    - ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
    - ▶ Détecteurs Gazeux
    - ▶ Quelques exemples
    - ▶ Effets annexes, et considérations «pour ingénieurs»
  - La pratique et le futur...
    - ▶ Quelques ruses...
    - ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout & le particle flow.
- 
- Mercredi**
- Jeudi**
- Vendredi**

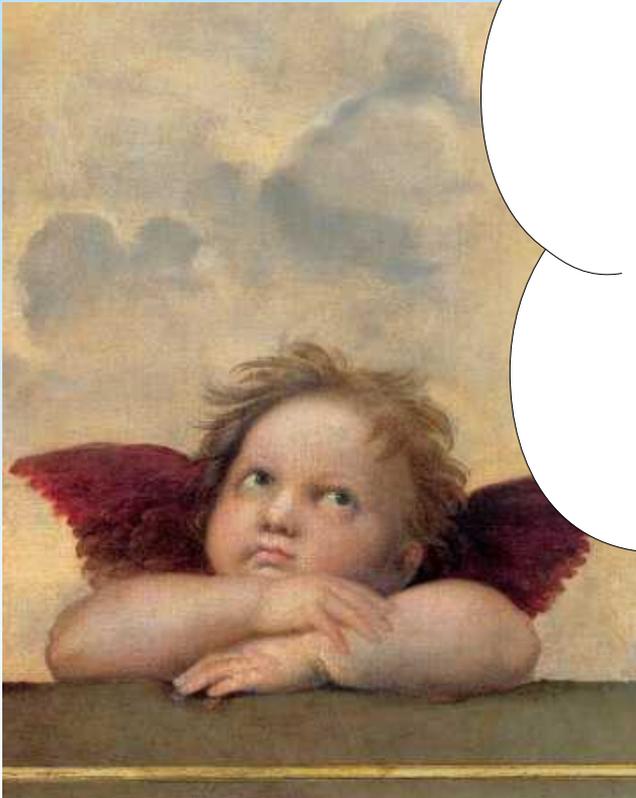
# Rappel

- Calorimétrie = mesure de l'énergie des particules (passant le trajectographe) par arrêt
- $e^\pm$  et  $\gamma \rightarrow$  gerbes dans le calorimètre EM (ECAL)
  - ▶  $\sim 30 X_0 \sim 20$  cm de mat dense
  - ▶  $r \sim 2 R_M \sim qq$  cm ; ( $R_M = R_{90\%}$ )
- Hadrons  $\rightarrow$  gerbe dans le ECAL et le HCAL
  - ▶  $\lambda_{int} \sim 30 X_0$
  - ▶ Gerbes :  $L_{95\%} \sim 8 \lambda$ ,  $R_{95\%} \sim 1,5 \lambda$
  - ▶ Grosse fluctuation (composante EM, forme, ...)
- Muons
  - ▶ ... ne font que passer...
  - ◆ Calorimètre (si suffisamment segmenté) + ch. magnétique = trajectographe



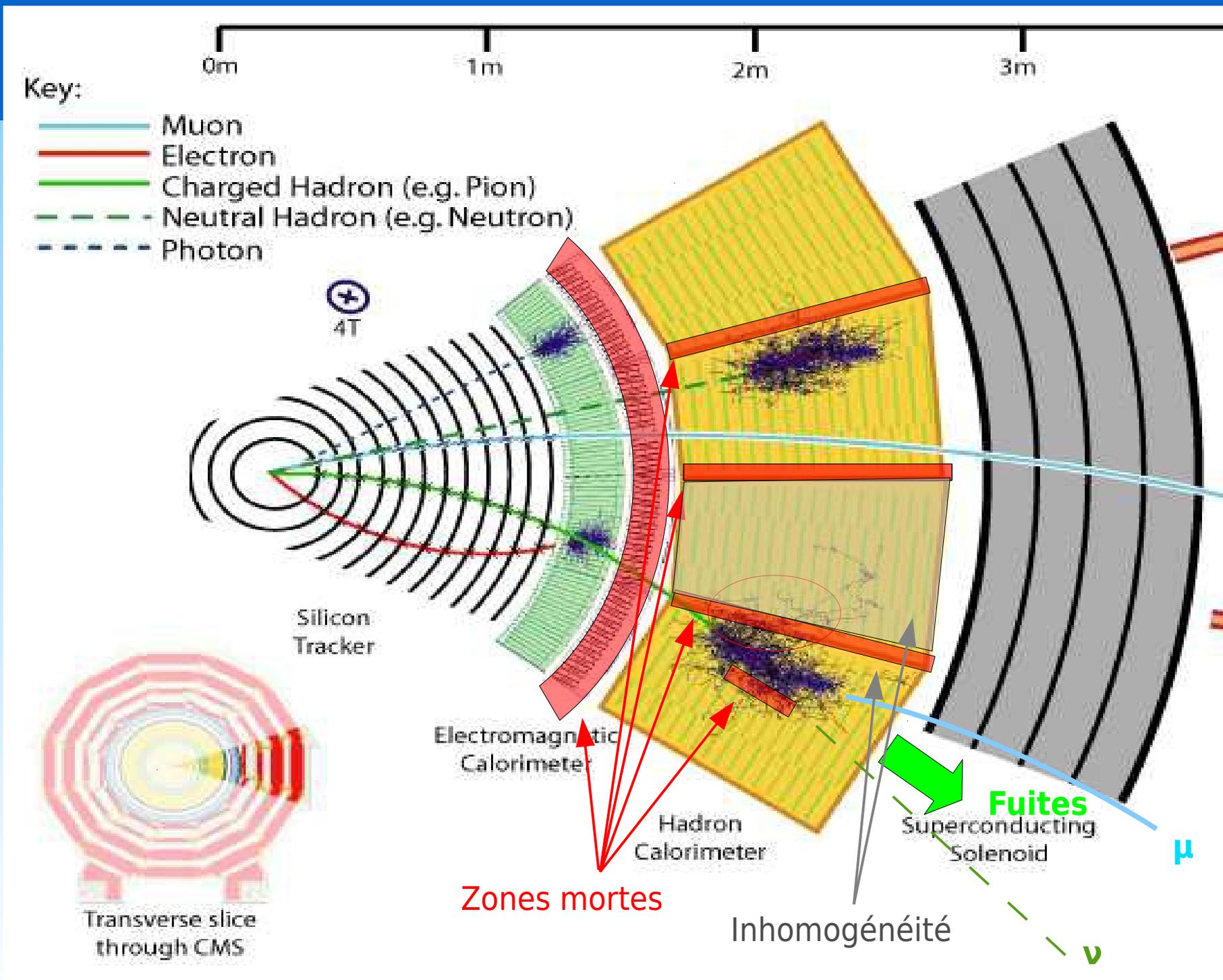
# **L'élaboration d'un calorimètre : les critères**

# Le détecteur parfait



- infini (pas de pertes)
- Sans bruit
- Infiniment précis
- Linéaire
- Précis spatiale<sup>t</sup>  
& angulaire<sup>t</sup>
- Rapide
- Homogène
- Stable
- Identification
- Séparation de  
particules

*+ Bon marché...*



# Les détecteurs réels



Un expérimentateur...

- infinie (sans pertes)
- Sans bruit
- Infiniment précise
- Linéaire
- Rapide
- Stable
- Homogène
- Identification
- Position & angle
- Séparation
- % de pertes de fuite
- Résolution
- Non Linéarité
- Vitesse + empilement + Taux d'occupation
- Variations ( $\Rightarrow$  radiations)
- Inhomogénéité  $\delta$
- Efficacité & Pureté
- Précision position & Angle
- % Confusion ( $e/\pi$ , hadrons, jets isolés, 2 jets)

+ *Bon marché...*

€€€ !!

< 10% machine ?

# Comment on estime l'énergie:

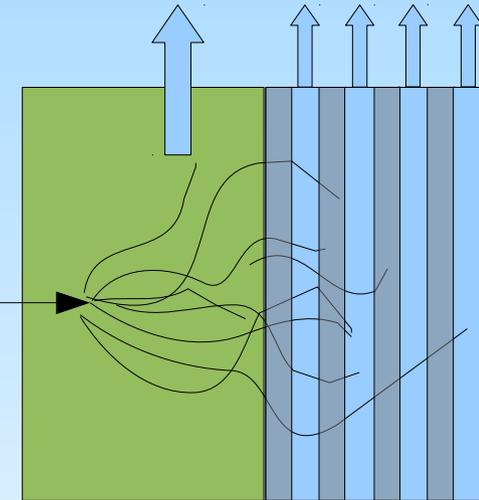
en décomptant la longueur de trace chargée générée

estimée, échantillonnée  
par le nombre de chargés  
( $e^\pm$ ,  $p$ ,  $\pi$ , fragments)  
produits

la Mesure c'est du Comptage

Nb Porteur d'information  $\propto$  Nb de Photons (visibles)  
*Indépendants*  
Nb d'électrons  
Nb d'étincelles....

Messenger = électrons,  
photons



Homogène ou à échantillonnage

Processus stochastique:  $\delta N = \alpha \sqrt{N}$   
(Poisson)

$$E \propto N \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}}$$

# Mesure de la résolution

$$a \oplus b = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Termes:

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \frac{\beta}{E} \oplus \gamma$$

$\alpha$  stochastique  
 $\beta$  bruit  
 $\gamma$  intercalibration (inhomogénéité)

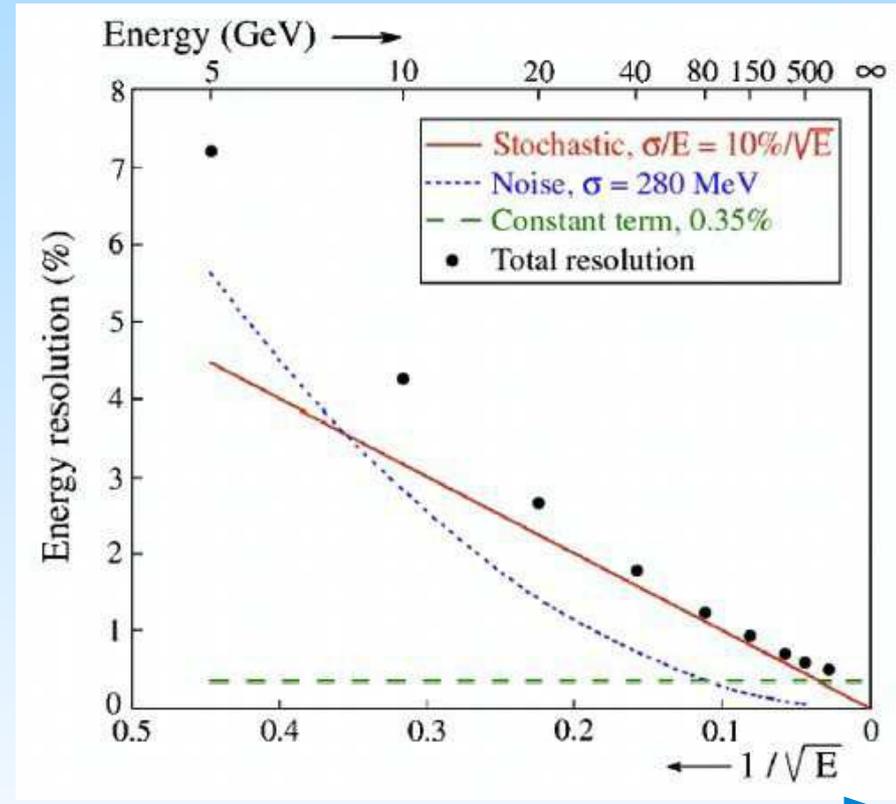
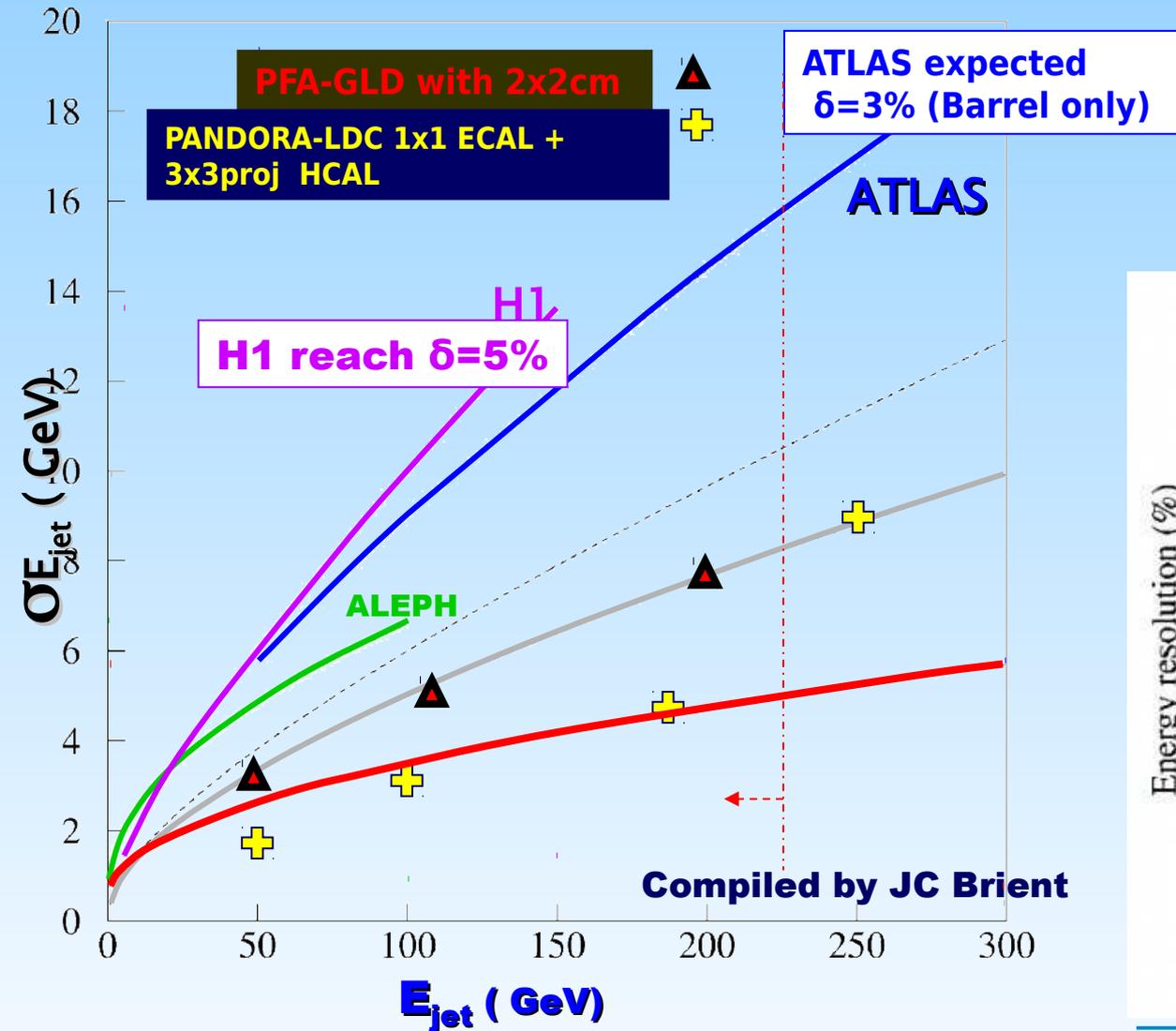
- Fuite :  $\oplus \sigma_{\text{fuite}} \sim 4 f_{\text{fuite}}$   
(corrigé mais pas les fluctuations)
- Fluctuations additionnelles due à la technologie
  - ▶ saturations, effet de charge d'espace...

- $\sigma(E)/E$**
- **Electromagnétique**
    - e,  $\gamma$  isolés
  - **Hadronique**
    - h isolés
  - **Jets**
    - Mélange :  $\gamma$ , h, e

# Résolution : performance

$\alpha$  :

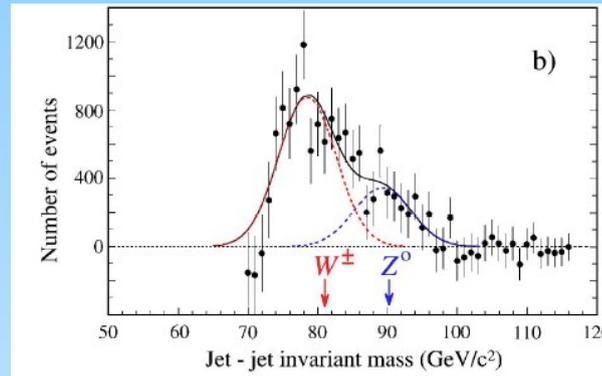
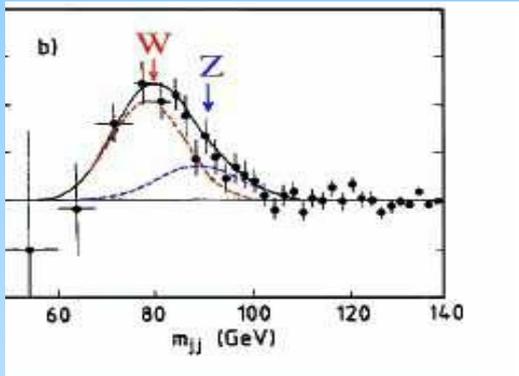
- EM :  $\sim 3\text{--}20\% / \sqrt{E}$  (GeV)
- Had :  $\sim 50\% / \sqrt{E}$  (GeV)
- $\delta \sim 5\%$  (mauvais) —
- 0.5% (bon)



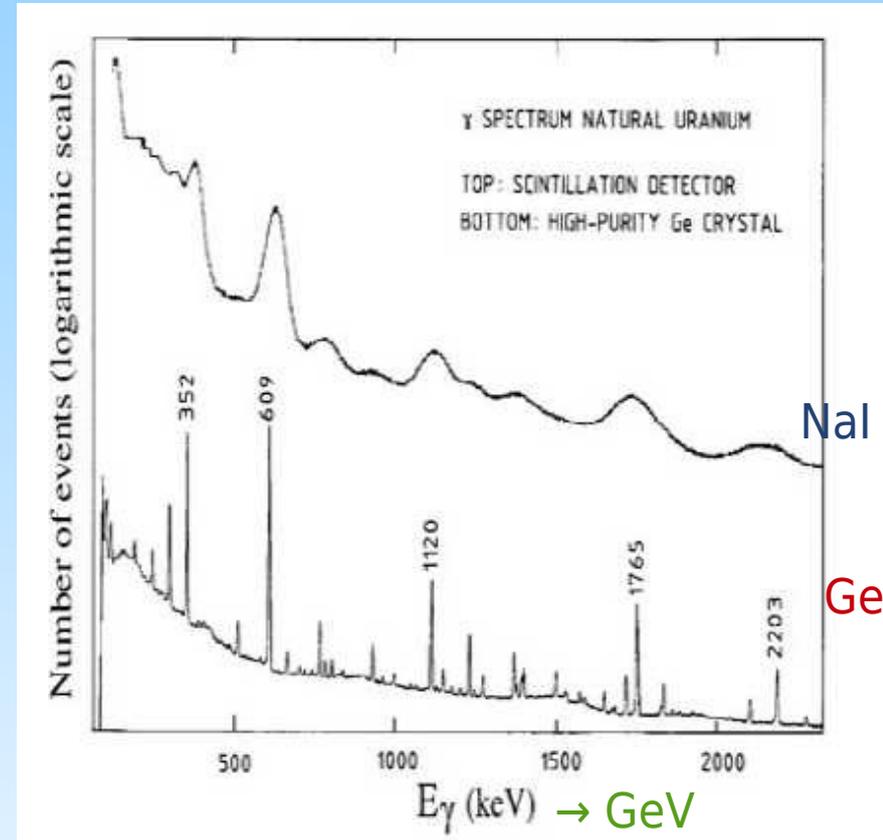
Hautes énergies  $\rightarrow$

# La résolution

CDF

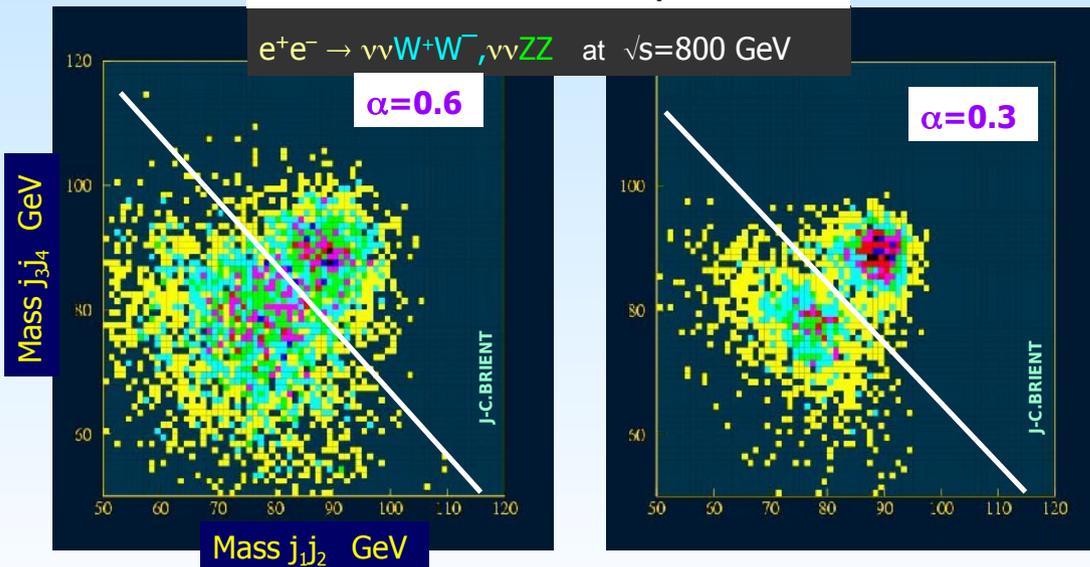


Reconstruction de la masse des W &  $Z^0$   
 dans UA2(années 80-90), CDF (2000)  
 Pour l'ILC (année 2019?)



WW versus ZZ separation

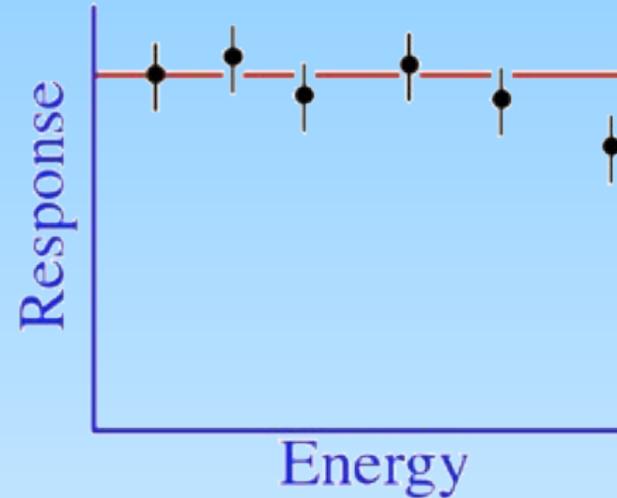
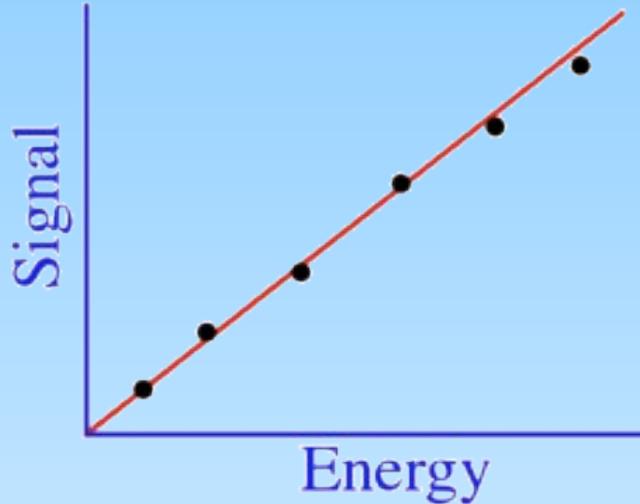
$e^+e^- \rightarrow \nu\nu W^+W^-, \nu\nu ZZ$  at  $\sqrt{s}=800$  GeV



Spectre SUSY dans 5-20 ans ???

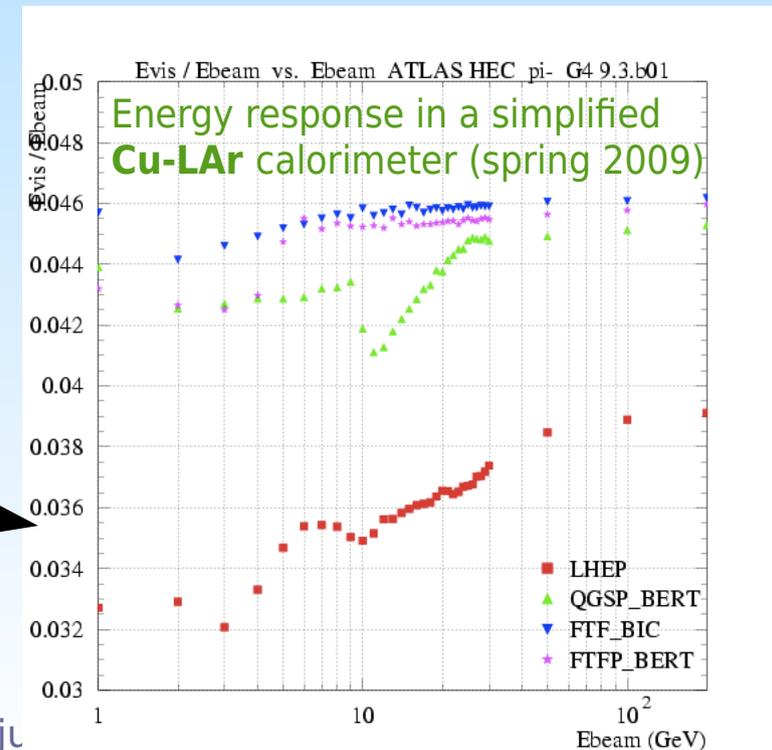
$\alpha \times 0.5 \Leftrightarrow$  Gain de 40% sur la  $\mathcal{L}$

# La linéarité $E \propto N$



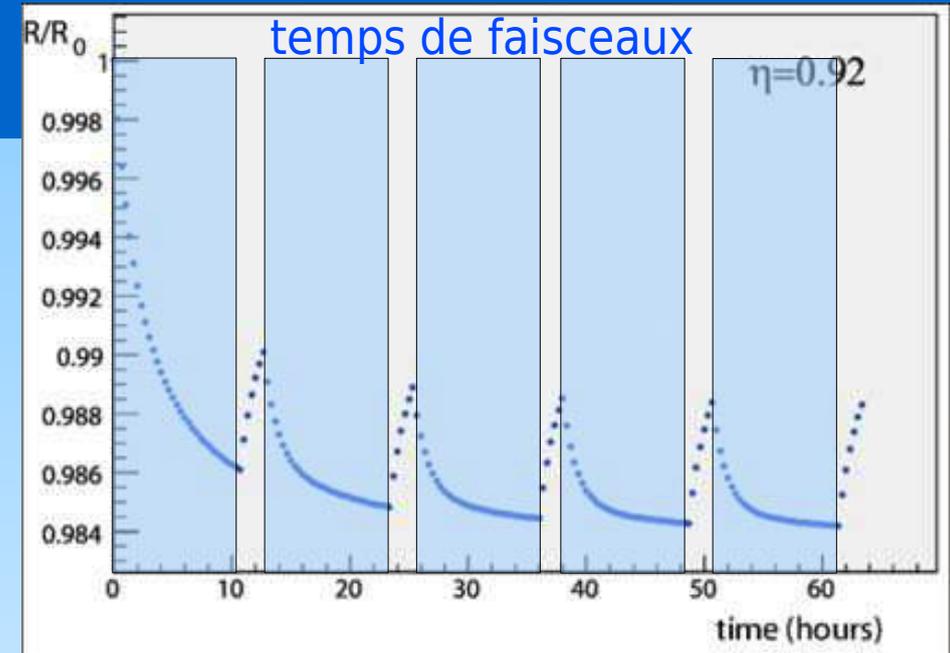
- En général OK pour EM
- Plus difficile pour l'Hadronique
  - ▶ facteur  $e/h = f(f_{\pi 0}) = f(E)$
  - ▶ Leakage
    - ◆ Correction par les Monte-Carlo
      - Validités des modèles MC ?
    - ◆ Calibration par des tests
      - Pas des jets...

~10%



# La calibration

- Non homogénéités dominantes à haute énergie
- instabilités en temps (radiation)
  - ▶ Système de calibration
  - ▶ Très dépendant des techniques utilisées
- Intercalibration
  - ▶ En faisceaux-test avant montage + calibration
  - ▶ Par les cosmiques
  - ▶ Par les  $\mu$  du faisceau
  - ▶ Par les processus physiques
    - ◆ Balance en E
    - ◆  $Z \rightarrow ee, \mu\mu, \tau\tau$



Réponse des cristaux de PbWO4 à la radiation

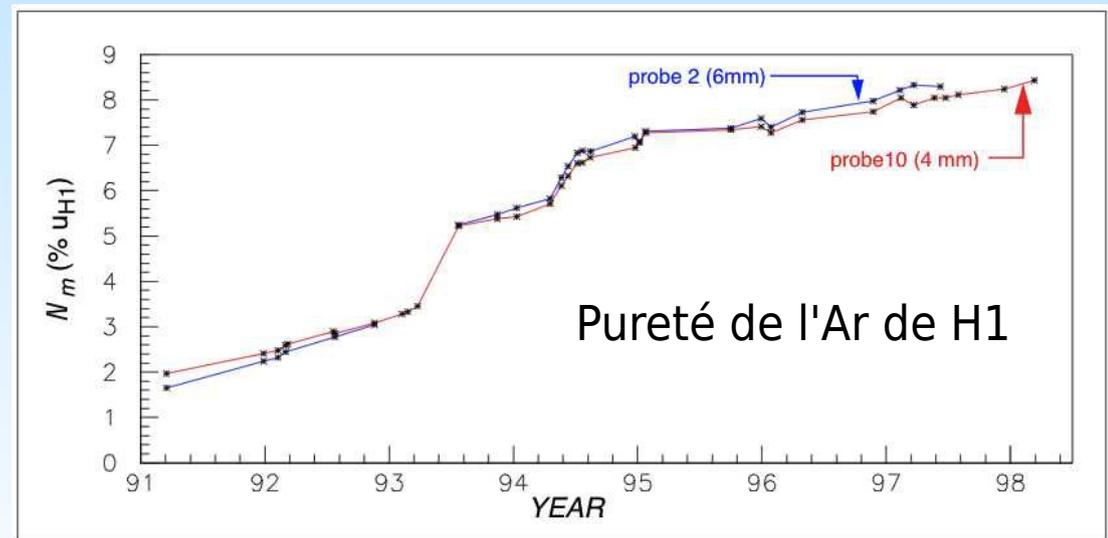
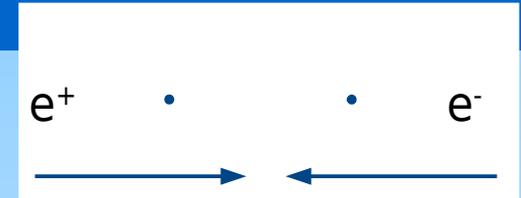
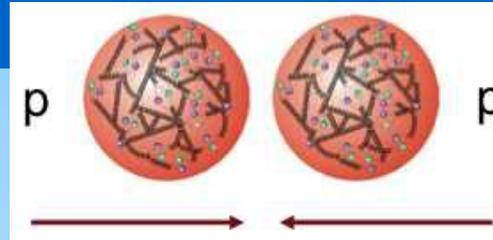


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

# Lecture des données



## Acquisition

### ▶ Déclenchement

- ◆ lecture de 1er niveau
  - Sommes partielles
- ◆ lecture complète
  - Calculs de niveau 2...n
    - rejet

### ◆ Écriture

### ▶ Sans trigger

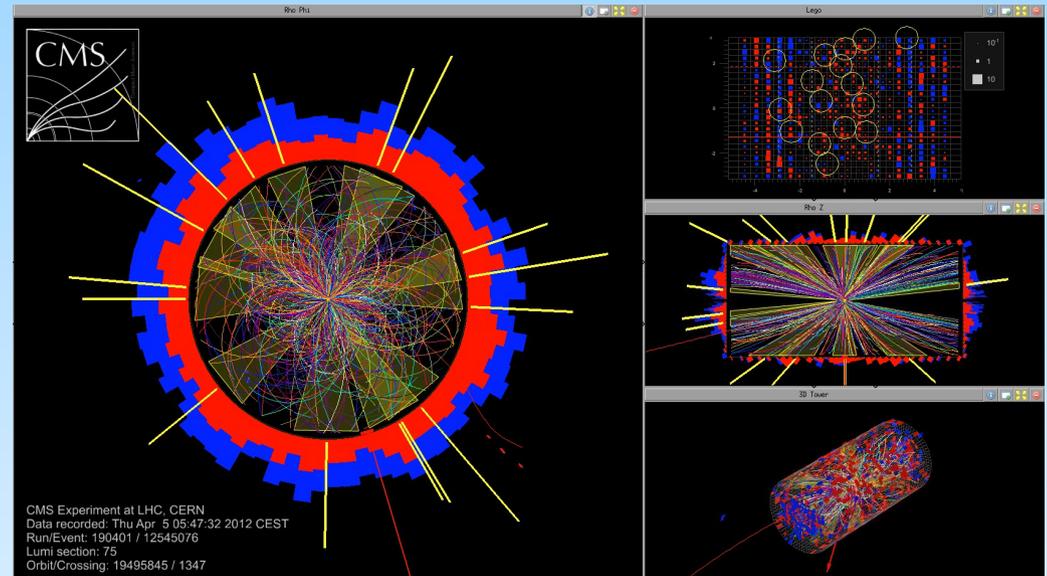
## Taux d'occupation

### ▶ Physique

### ▶ Technologie machine

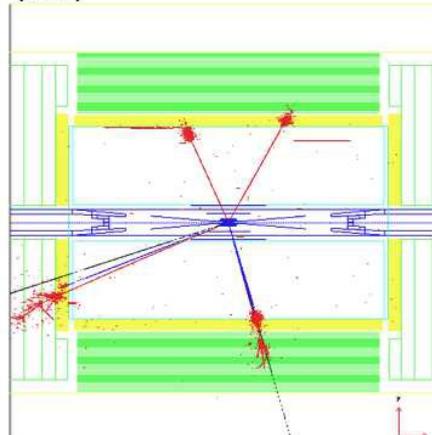
- ◆ LHC : pp @ 25 ns
- ◆ ILC : ee @ 400 ns & 5Hz
- ◆ CLIC : ee @ 2.5 ns & 50 Hz...

## Temps de lecture...

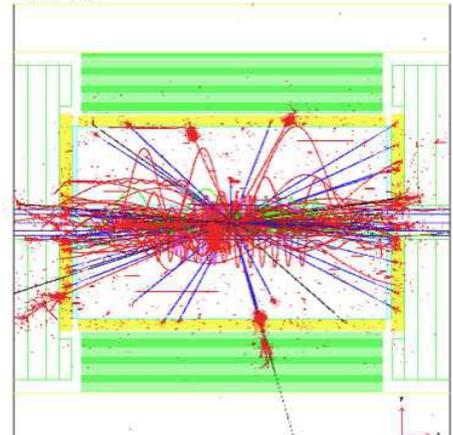


HZ  $\rightarrow$   $\tau\tau ee$  event

Without soft hadronic events overlaid (=ILC)



With 32 BX (=16 ns) „CLIC nominal 500” overlaid



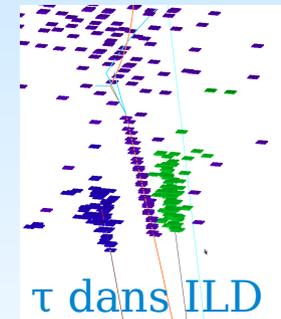
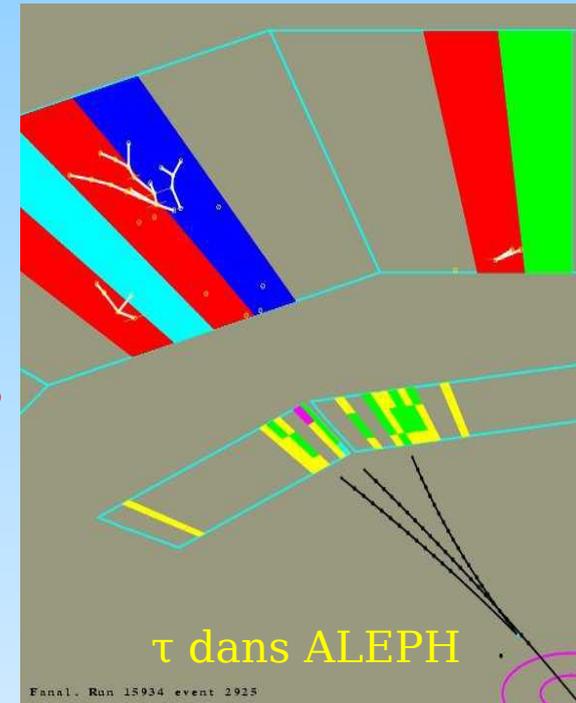
# Autres éléments critiques

- En position
  - ▶ Liens traces ↔ dépôts calorimétrique
    - ◆ ⚠ Energy Flow & Particle Flow
- Angulaire
  - ▶  $\gamma$  pointant vers le vertex, un jets, une particule exotique ?
- Précision en temps
  - ▶ Réjection du BdF
  - ▶ temps de vol (identification)
  - ▶ Composante neutronique
  - ▶ Physique «exotique»



Type de collision

But de physique



# Identification de particules

- Utile pour
  - ▶ Sélection d'événements
  - ▶ meilleure estimation de l'énergie
- Séparations
  - ▶ EM vs Hadron
    - ◆ Forme des gerbes
      - Latérale / Longitudinale
      - $f_{EM} = E_{Ecal} / (E_{Ecal} + E_{hcal})$
      - densité d'énergie
    - ◆ limite ( $\sim 10^{-4}$ ) : processus hadroniques
      - $\gamma \rightarrow \mu\mu, \pi\pi$
      - $\pi^+ + n \rightarrow \pi^0(\rightarrow\gamma\gamma) + p$
  - ▶  $\gamma$  simple vs  $\pi^0$ 
    - ◆ 2 gerbes EM très proches...
  - ▶  $\mu$  vs  $\pi$  / hadrons
  - ▶ Jets vs  $\tau$

## Particle ID with a very simple Preshower Detector

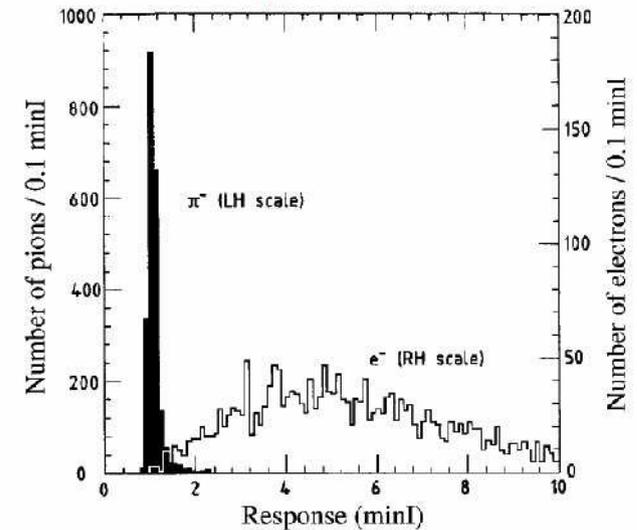


FIG. 7.35. Signal distributions for 75 GeV pions and electrons in a preshower detector used in beam tests of CDF calorimeters.

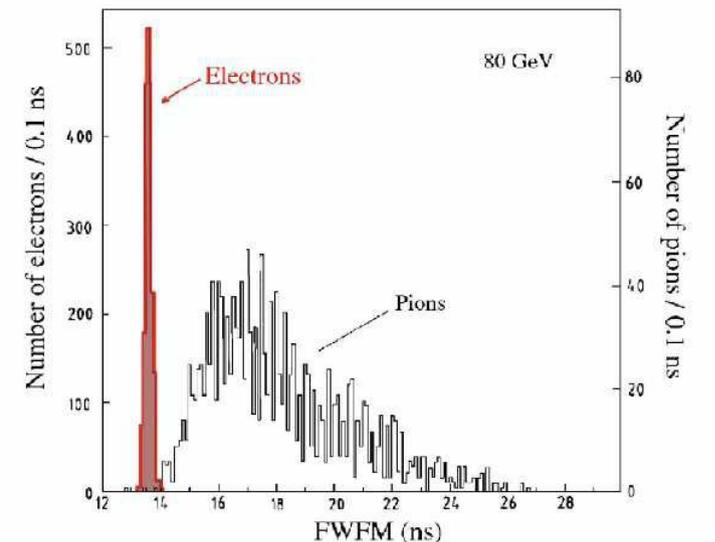
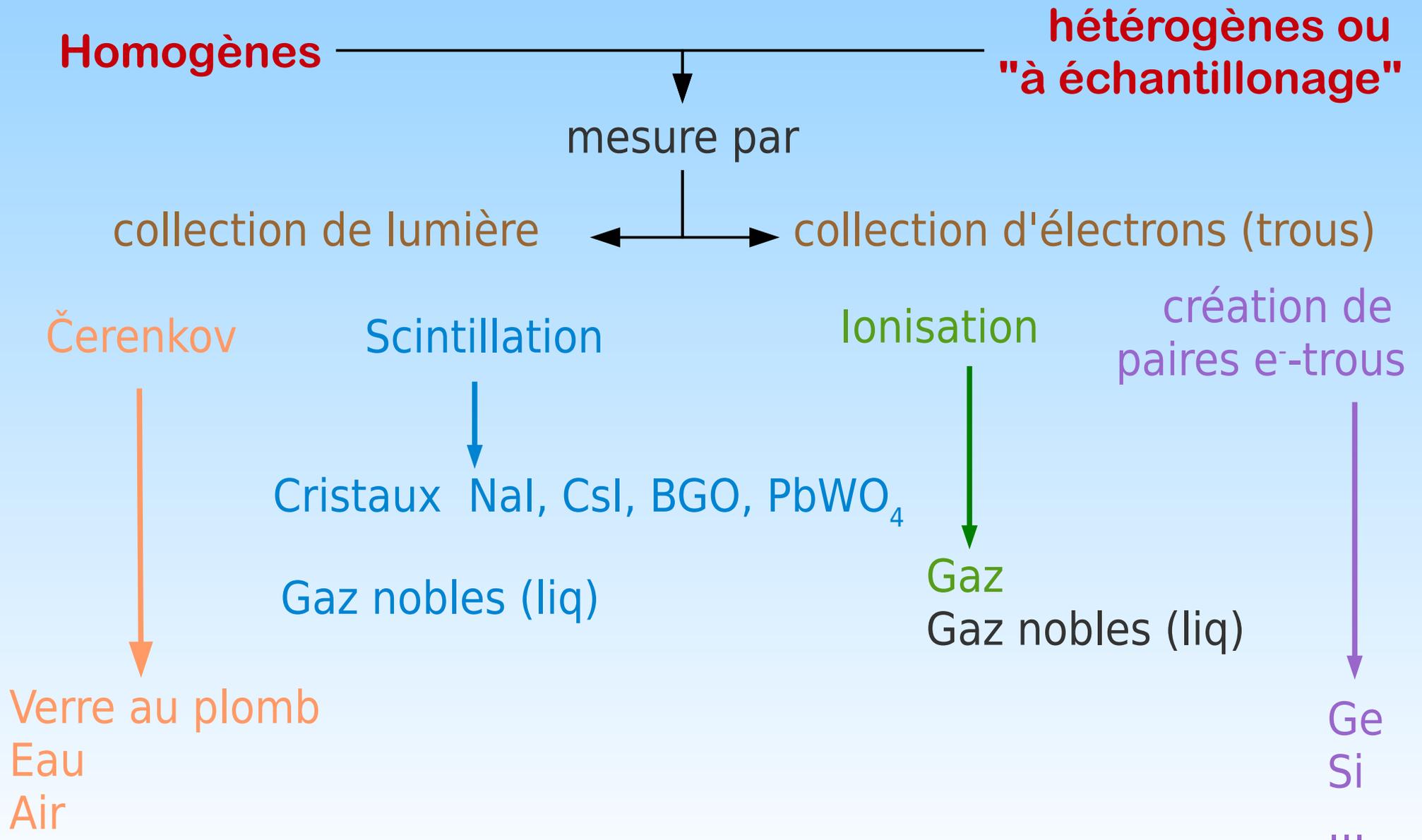


FIG. 7.33. The distribution of the full width at one-fifth maximum (FWFM) for 80 GeV electron and pion signals in SPACAL [Aco 91a].

# **Choix des outils : Les senseurs**

# Au menu...



# Calorimètres à échantillonnage (sampling)

## Radiateurs

pour l'électromagnétique (Z élevé):

Plomb Pb, Uranium U, Tungstène W

attention aux propriétés physiques mais aussi mécaniques !

pour l'hadronique (bon marché, bon mécaniquement)

fer (retour de champ),

inox (dans un champ), cuivre

plomb, tungstène, uranium?

$e/h \sim 1$

l'énergie hadronique échappe  
sous forme de fission de noyaux,  
neutrons de basse énergie  
⚠ *délais...* ⚠

Détecteurs similaires pour les deux:

scintillateurs,

lumière Čerenkov,

chambres à ionisation, argon liquide, liquides chauds,

chambres à gaz en différents modes (prop, streamer, Geiger),

détecteurs silicium.

# Fraction d'échantillonnage

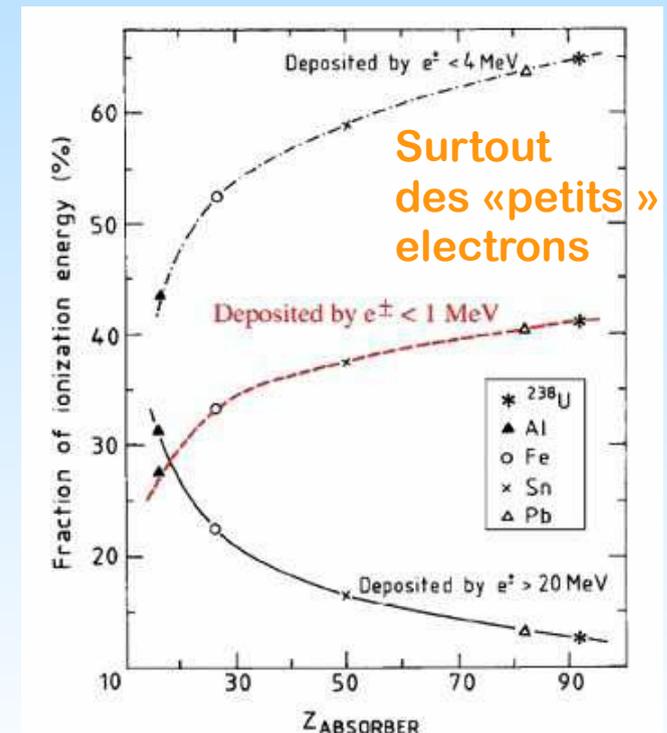
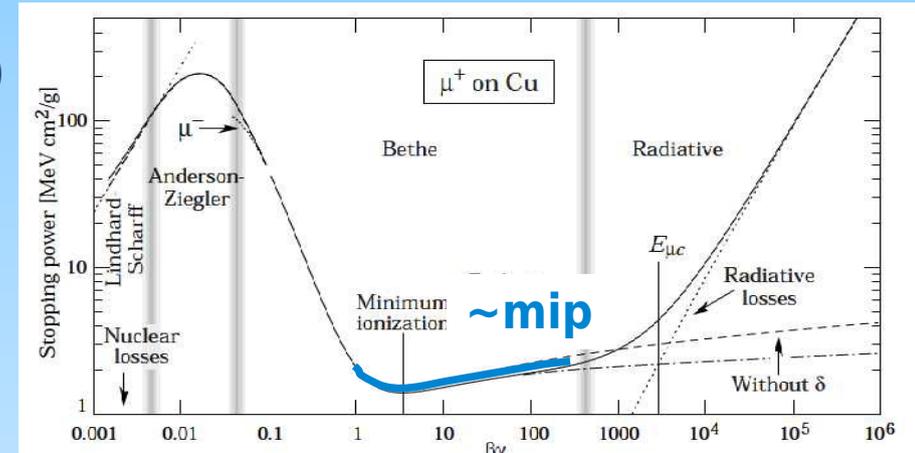
- Développement de gerbe → radiateur (dense)
- **mips** dans les senseurs («légers»)

$$f_{\text{échant.}} = \frac{(dE/dx)_{\text{mip}}(\text{senseur})}{(dE/dx)_{\text{mip}}(\text{total})}$$

$$\Rightarrow \frac{e}{\mu}$$

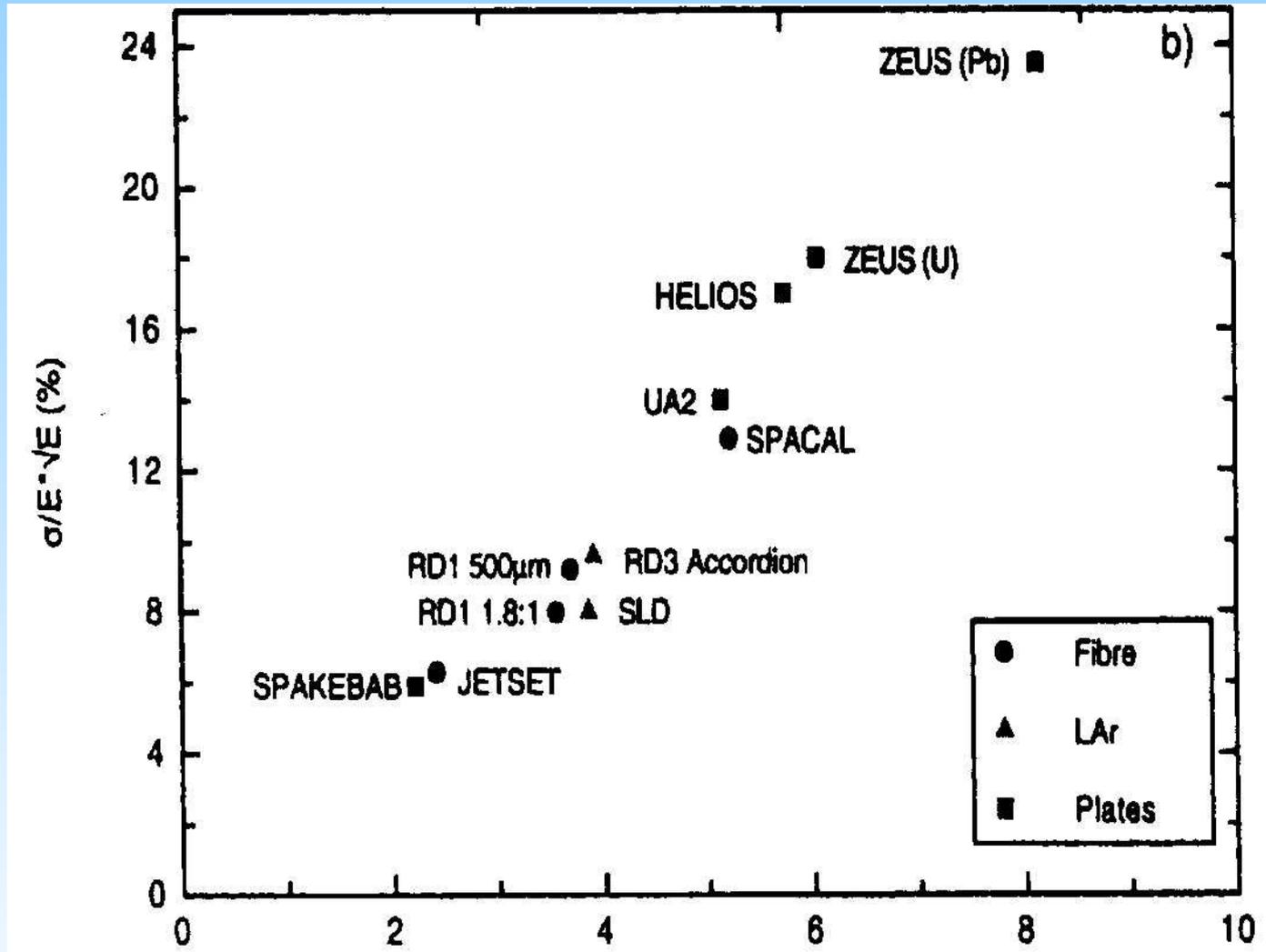
- Calorimètres homogènes :  $e/\mu = 1$
- Calorimètre à échantillonnage :  $e/\mu < 1$  (ou  $\ll 1$ )
  - ▶ petits photons absorbés :  $\sigma_{\text{p.e.}} \propto Z^4$
  - ▶ Emission de X par les grands Z

$$\frac{\delta E_{\text{échant.}}}{E} = \frac{\alpha_{\text{homog.}} \sim 2.7\%}{\sqrt{E}} \times \sqrt{\frac{d \text{ [mm]}}{f_{\text{échant.}}}}$$



# Résolution vs $f_{\text{échant.}}$

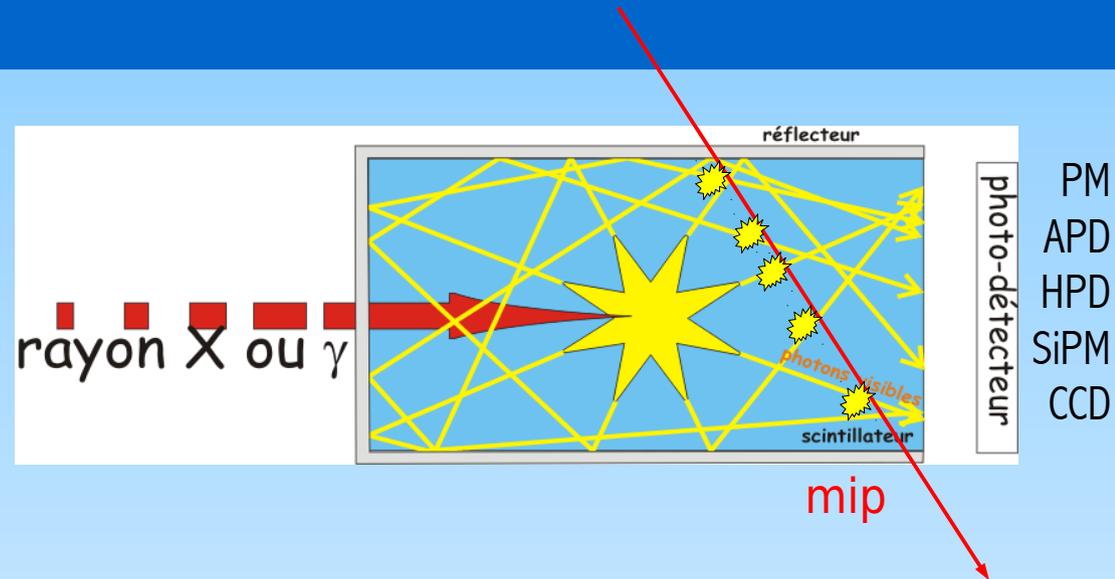
R. Wigmans



$$\sqrt{\frac{d \{ \text{mm} \}}{f_{\text{échant.}}}}$$

# Scintillateurs

- Conversion d'une partie de l'ionisation en lumière
  - ▶ fluorescence = émission immédiate
  - ▶ phosphorescence = émission retardé
- Avantages / Désavantages
  - ▶ ⊕ peu de bruit (lumière)
  - ▶ ⊖ nécessite une conversion lumière → élect.
- 2 Types
  - ▶ organique
    - ◆ peu chers
    - ◆ légers, peu sensibles aux  $\gamma$ 
      - échantillonnage
    - ◆ flexibles (solide / liquide, fibres, ...)
    - ◆ rapides ( $\sim 0.1$  ns)
    - ◆ sensibles aux n ( $\Rightarrow$  H)
    - ◆ Sensibilité aux radiations.
      - Récupération à l'Oxygène
    - ◆ Ex : polystyrène

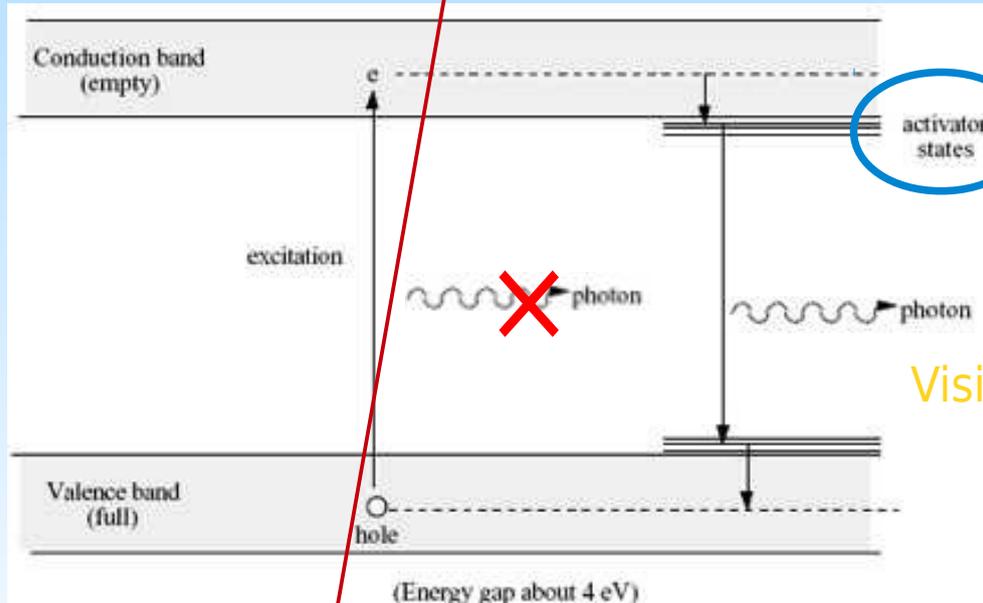


- ▶ in-organique
  - ◆ chers
  - ◆ denses, bon rendement
    - homogène, pas de segmentation
  - ◆ Fragile, hygroscopique
    - Sensibilité env. ( $t^\circ$ , rad)
  - ◆ généralement lents
  - ◆ Ex : NaI(Tl), CsI,  $\text{PbWO}_4$

# Mécanismes de scintillation

- Organique :
  - Chaîne complexes & rapide molécule → molécules.

- Inorganique :



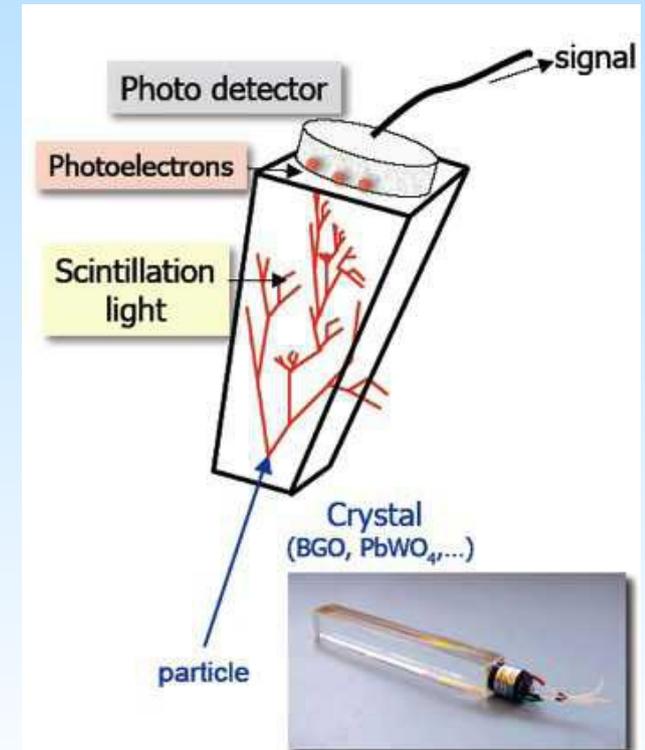
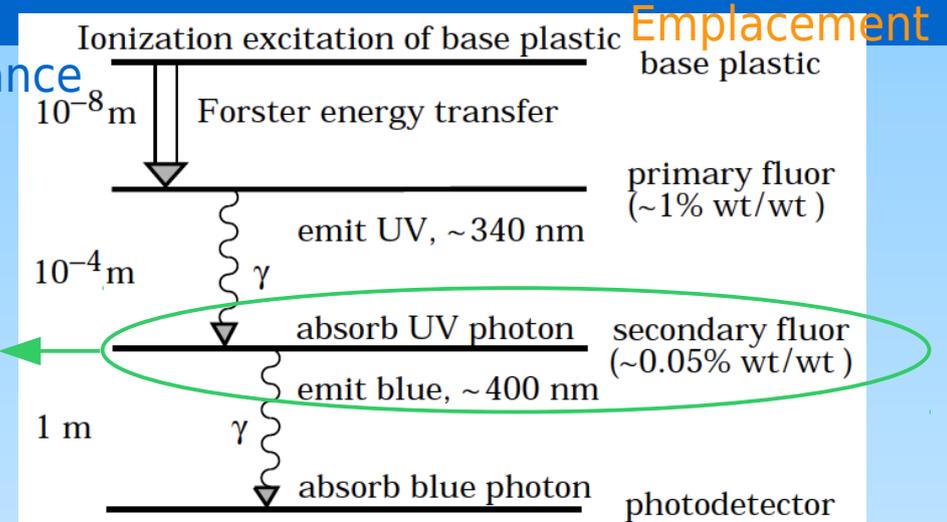
dopant  
ou défauts  
ou impureté

Visible / UV

Parfois : Fibre WLS

$$\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$$

Distance



# Quelques scintillateurs inorganiques

| Crystal                                     | Nal(Tl)         | CsI(Tl)                           | CsI        | BaF <sub>2</sub>      | BGO                   | PWO(Y)                           | LSO(Ce) | GSO(Ce) |
|---|-----------------|-----------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|---------|---------|
| Density (g/cm <sup>3</sup> )                | 3.67            | 4.51                              | 4.51       | 4.89                  | 7.13                  | 8.3                              | 7.40    | 6.71    |
| Melting Point (°C)                          | 651             | 621                               | 621        | 1280                  | 1050                  | 1123                             | 2050    | 1950    |
| Radiation Length (cm)                       | 2.59            | 1.86                              | 1.86       | 2.03                  | 1.12                  | 0.89                             | 1.14    | 1.38    |
| Molière Radius (cm)                         | 4.13            | 3.57                              | 3.57       | 3.10                  | 2.23                  | 2.00                             | 2.07    | 2.23    |
| Interaction Length (cm)                     | 42.9            | 39.3                              | 39.3       | 30.7                  | 22.8                  | 20.7                             | 20.9    | 22.2    |
| Refractive Index <sup>a</sup>               | 1.85            | 1.79                              | 1.95       | 1.50                  | 2.15                  | 2.20                             | 1.82    | 1.85    |
| Hygroscopicity                              | Yes             | Slight                            | Slight     | No                    | No                    | No                               | No      | No      |
| Luminescence <sup>b</sup> (nm)<br>(at peak) | 410             | 550                               | 420<br>310 | 300<br>220            | 480                   | 425<br>420                       | 402     | 440     |
| Decay Time <sup>b</sup> (ns)                | 230             | 1250                              | 30<br>6    | 630<br>0.9            | 300                   | 30<br>6                          | 40      | 60      |
| Light Yield <sup>b,c</sup> (%)              | 100             | 165                               | 3.6<br>1.1 | 36<br>3.4             | 21                    | 0.29<br>.083                     | 83      | 30      |
| d(LY)/dT <sup>b</sup> (%/°C)                | ~0              | 0.3                               | -0.6       | -2<br>~0              | -1.6                  | -1.9                             | ~0      | -0.1    |
| Experiment                                  | Crystal<br>Ball | CLEO<br>BaBar<br>BELLE<br>BES III | KTeV       | TAPS<br>(L*)<br>(GEM) | L3<br>BELLE<br>PANDA? | CMS<br>ALICE<br>PrimEx<br>PANDA? | -       | -       |

← Prix ← Compacité

Č + optique  
Mécanique

Optique + Ampli

σ(t) + DAQ

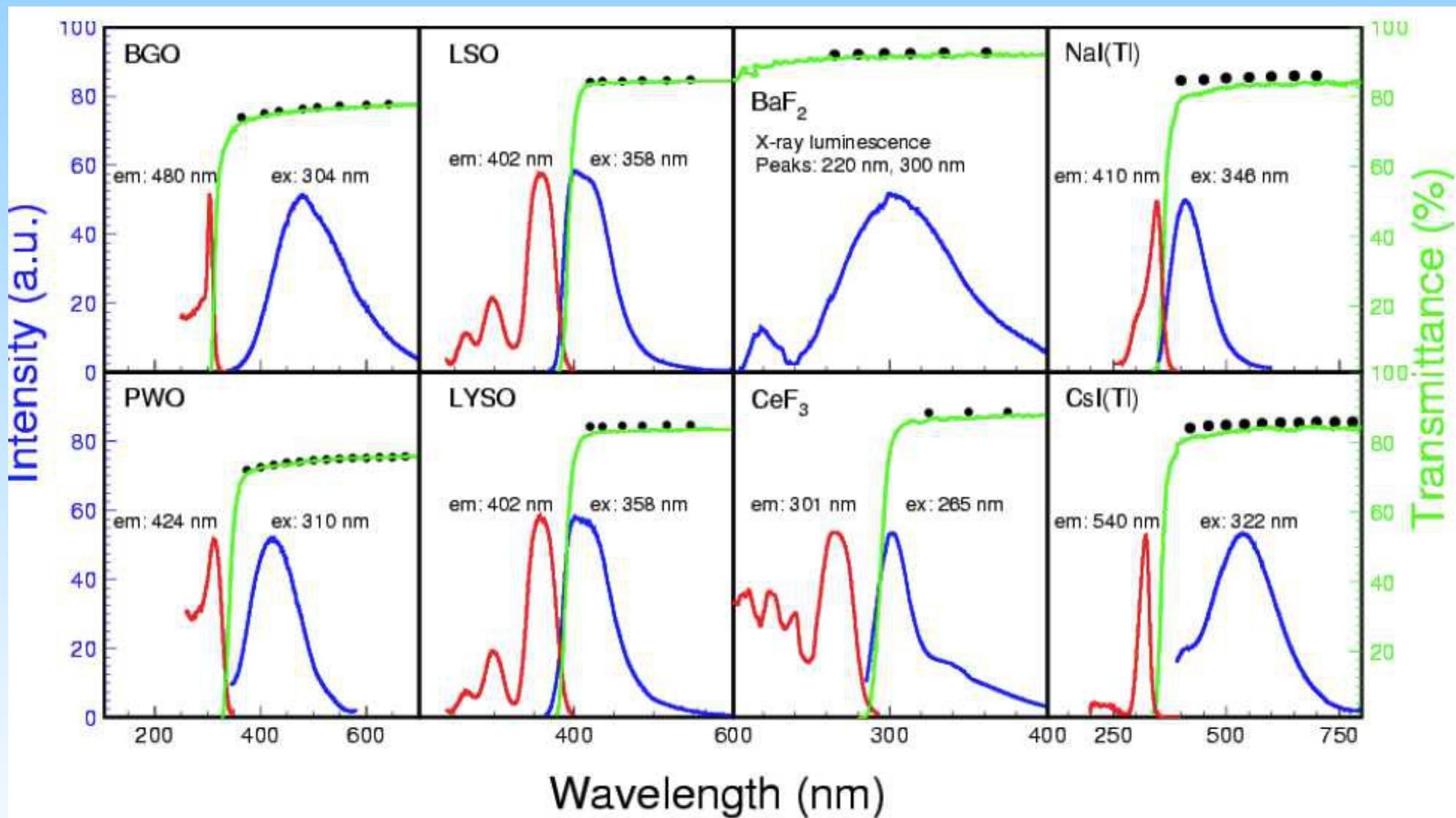
σ(E)

Stabilité

a. at peak of emission; b. up/low row: slow/fast component; c. PMT QE taken out.

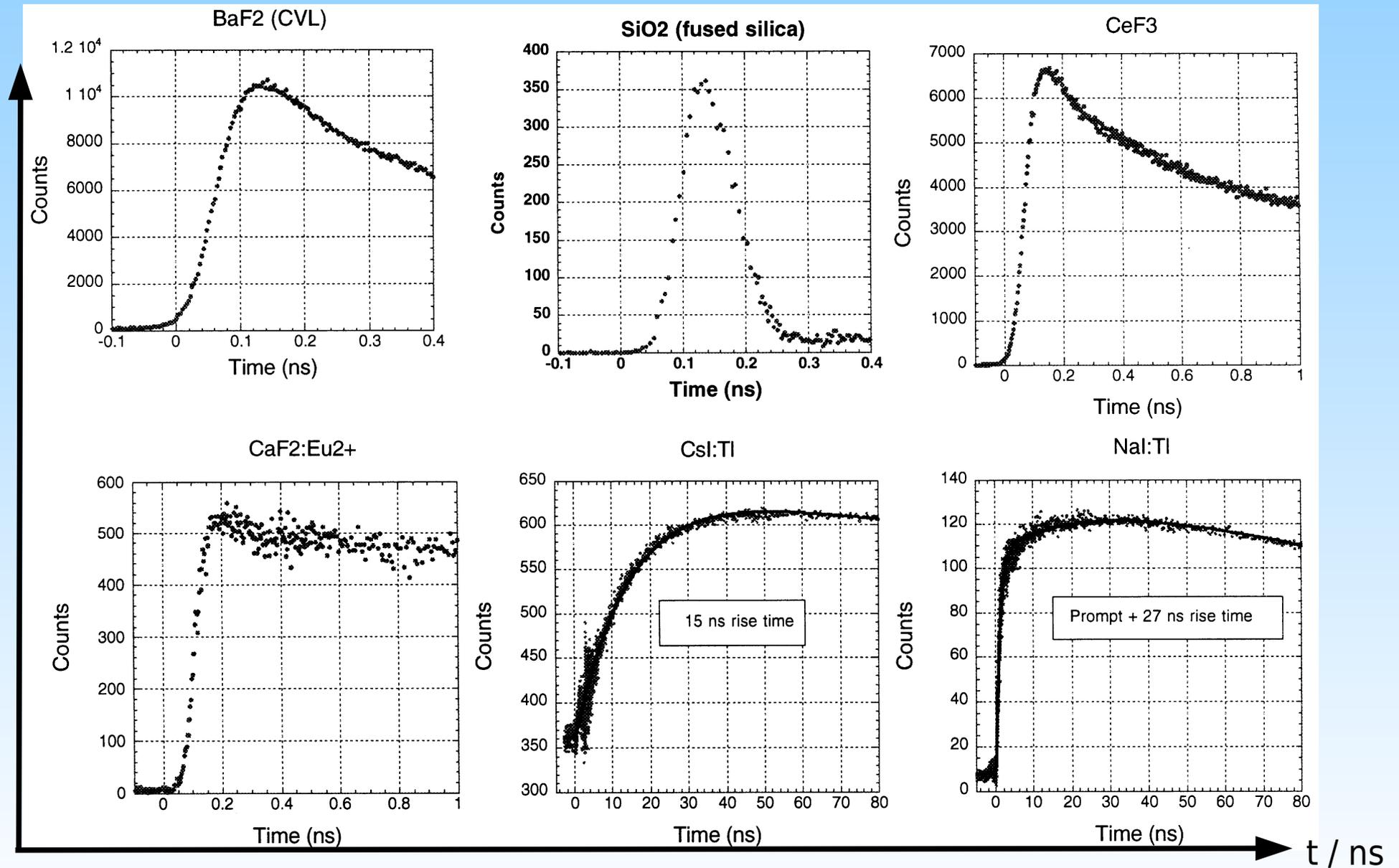
R.-Y. Zhu

# Lumière des scintillateurs



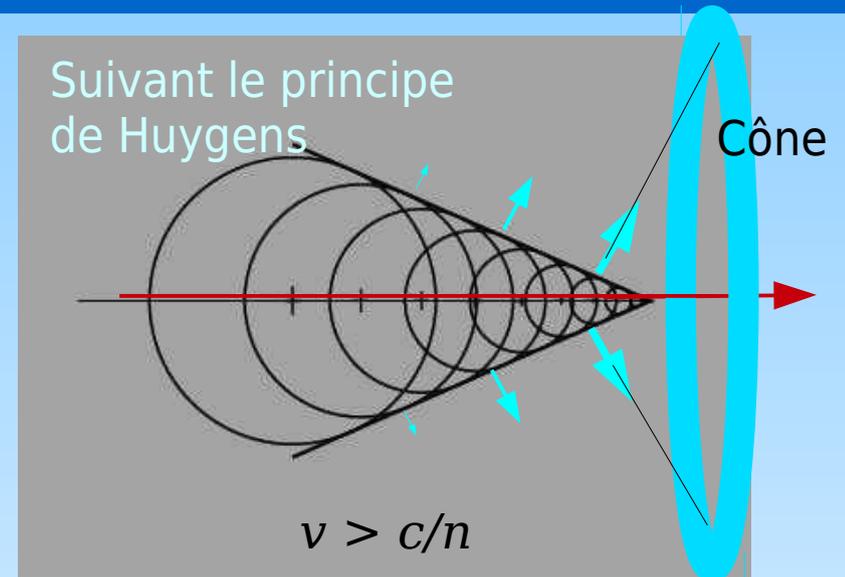
# Courbes de lumière

$N_\gamma$



# Čerenkov

- Types
  - ▶ Cristaux : indice > 1,5
  - ▶ Verre au Plomb
- fibres à quartz («Fused silica»)
  - ▶ Exemple Luminomètre de H1, FCAL de CMS, DREAM
- Sensibilité
- RadHard

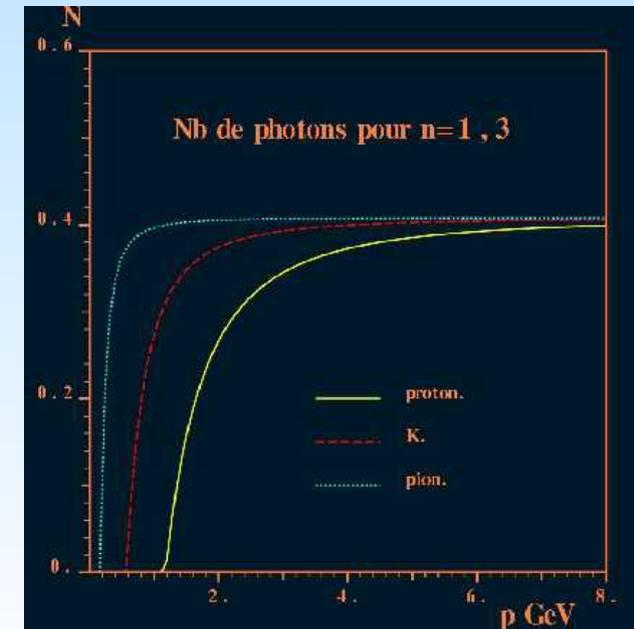


$$\cos \theta_y = \frac{1}{n\beta} + \frac{n^2 - 1}{2n\beta} \frac{E_y}{E_1} \quad \text{si} \quad \frac{1}{n} < \beta$$

$$N_\gamma : \frac{d^2 N}{dx dE_y} = \frac{\alpha}{\hbar c} \sin^2 \theta_y$$

Remarques: résolution en temps, polarisation linéaire

Exemple :  $dx = 1\text{cm} = 5 \cdot 10^4 \text{ eV}^{-1}$ ,  $dE = 0,02 \text{ eV} \Rightarrow dN \sim 7$



# Rendements...

cristaux scintillants

$$E_s \cong \beta E_{\text{gap}} \sim \text{eV}$$
$$\approx 10^2 \div 10^4 \gamma / \text{MeV}$$

$$\sigma / E \sim (0.03 \div 0.3)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Emetteurs Čerenkov

$$\beta > \frac{1}{n} \text{ ® } E_s \sim 0.7 \text{MeV}$$

$$\approx 600 \div 2000 \gamma / \text{GeV}$$

$$\sigma / E \sim (2 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Résolution finale avec toutes les contributions

$$\sigma / E \sim (1 \div 3)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

$$\sigma / E \sim (10 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Isabelle Wingerter-Seez

# Photo-detecteurs

- Amplifications

- ▶ Photo-Multiplicateurs

- ◆ simples
- ◆ multi-anode

- ▶ Hybride Photo-Diodes (HPD)

- ◆ PIN diode + HT

- ▶ Avalanche PD

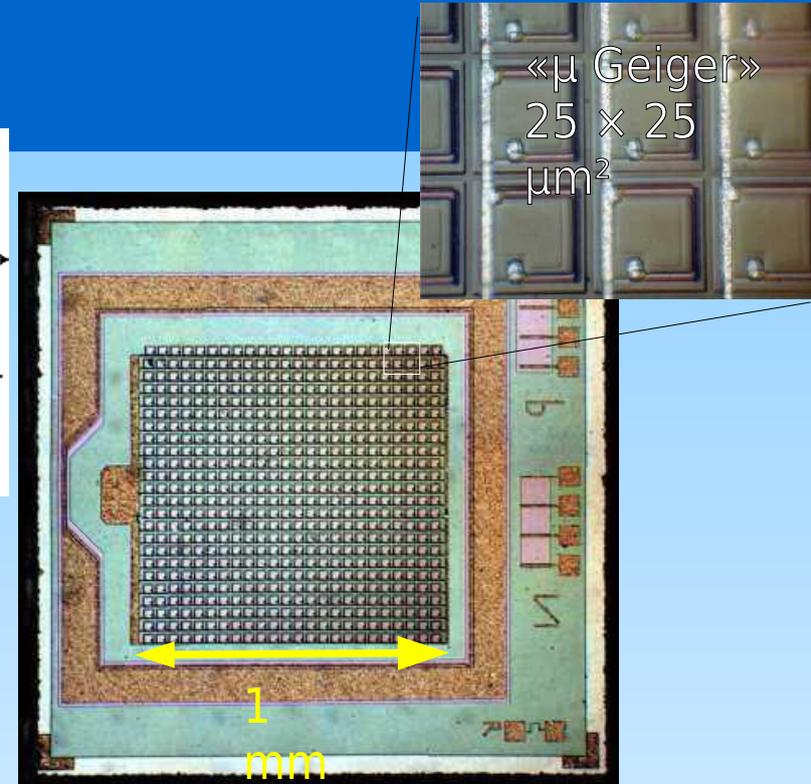
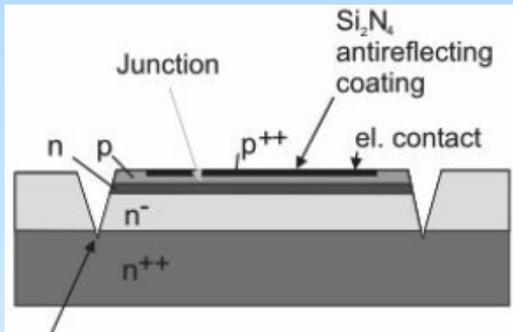
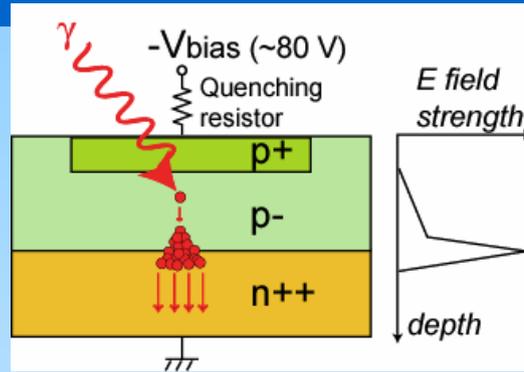
- ◆ CMS ECAL

- ▶ Pixelized Photo-Detectors (SiPM / MPPC)

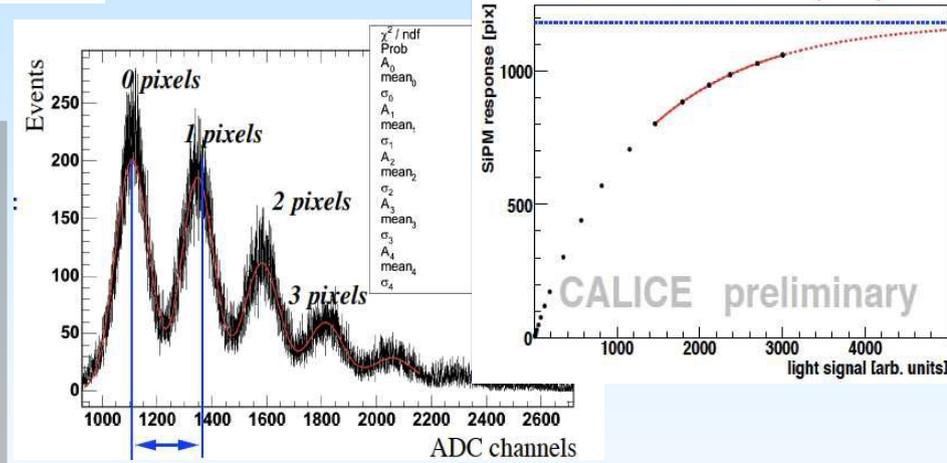
- Gain 1

- ▶ pour complétion (pas dans les calos)

- ◆ ex CNAO, systèmes de calibrations



**Efficacité  
quantique  
Surface  
Gain  
Linarité  
Bruit**



# Photodétecteurs

100nm <math>\lambda</math> <math>< 1000\text{ nm}</math> UV  $\rightarrow$  IR

| Type | $\lambda$<br>(nm) | $\epsilon_Q \epsilon_C$ | Gain                 | Risetime<br>(ns) | Area<br>(mm <sup>2</sup> ) | 1-p.e noise<br>(Hz) | HV<br>(V)            | Price<br>(USD) |
|------|-------------------|-------------------------|----------------------|------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| PMT* | 115–1700          | 0.15–0.25               | $10^3$ – $10^7$      | 0.7–10           | $10^2$ – $10^5$            | $10$ – $10^4$       | 500–3000             | 100–5000       |
| MCP* | 100–650           | 0.01–0.10               | $10^3$ – $10^7$      | 0.15–0.3         | $10^2$ – $10^4$            | 0.1–200             | 500–3500             | 10–6000        |
| HPD* | 115–850           | 0.1–0.3                 | $10^3$ – $10^4$      | 7                | $10^2$ – $10^5$            | $10$ – $10^3$       | $\sim 2 \times 10^4$ | $\sim 600$     |
| GPM* | 115–500           | 0.15–0.3                | $10^3$ – $10^6$      | $O(0.1)$         | $O(10)$                    | $10$ – $10^3$       | 300–2000             | $O(10)$        |
| APD  | 300–1700          | $\sim 0.7$              | $10$ – $10^8$        | $O(1)$           | $10$ – $10^3$              | $1$ – $10^3$        | 400–1400             | $O(100)$       |
| PPD  | 320–900           | 0.15–0.3                | $10^5$ – $10^6$      | $\sim 1$         | 1–10                       | $O(10^6)$           | 30–60                | $O(100)$       |
| VLPC | 500–600           | $\sim 0.9$              | $\sim 5 \times 10^4$ | $\sim 10$        | 1                          | $O(10^4)$           | $\sim 7$             | $\sim 1$       |

PMT = Photo-multiplicateur ; MCP = Micro Channel Plate; HPD = Hybrid Photo-Diode ;  
 GPM = Gas Photon-Detector;  
 APD = Avalanche Photo-Diodes ; PPD = SiPM = Pixelized Photon Detector;  
 VLPC = Visible Light Photon Counters

# Gaz nobles liquéfiés

- Ar, Kr, Xe
- Signal :
  - ▶ ionisation + scintillation (recombinaison)
    - ◆  $W_{e-h}$  élevé mais bruit ▼
  - ▶ Excellente résolution
    - ◆  $5\%/\sqrt{E}$  pour NA48
- ⊕ homogénéité
- Système cryogénique (→ Mat. morts)
- ⊖ contamination inéluctable (O)
  
- Exemple H1, Atlas, D0, NA48
  - ▶ Projets : Chambres larges biphasée  
→ «CaloTPC» + Amplification gazeuse  
(André Rubbia)

|                       | Ar   | Kr   | Xe   |
|-----------------------|------|------|------|
| Z                     | 18   | 36   | 58   |
| A                     | 40   | 84   | 131  |
| $X_0$ (cm)            | 14   | 4.7  | 2.77 |
| $E_C$ (Mev)           | 41.7 | 21.5 | 14.5 |
| $R_M$ (cm)            | 7.2  | 4.7  | 4.2  |
| W (eV/pair)           | 23.3 | 20.5 | 15.6 |
| v drift (mm/ $\mu$ s) | 10   | 5    | 3    |

→ Prix & rareté

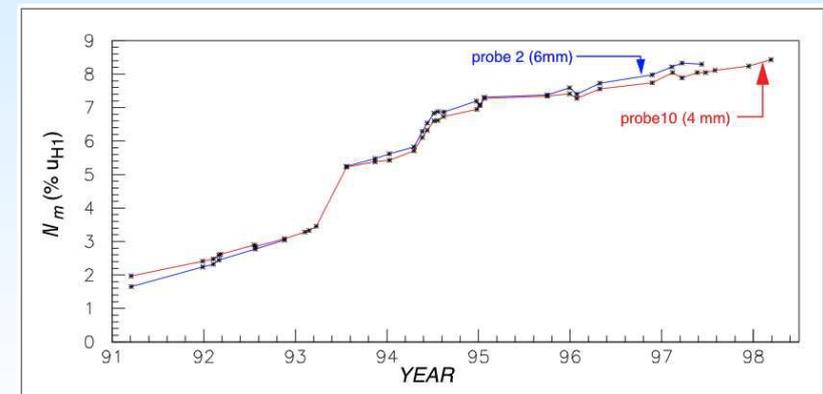
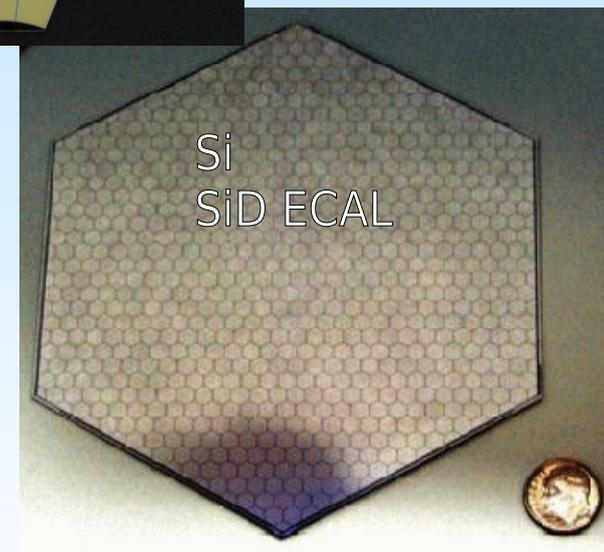
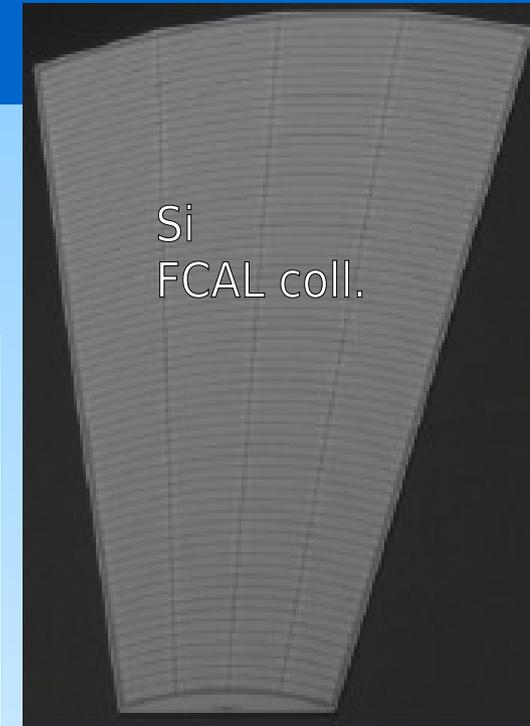
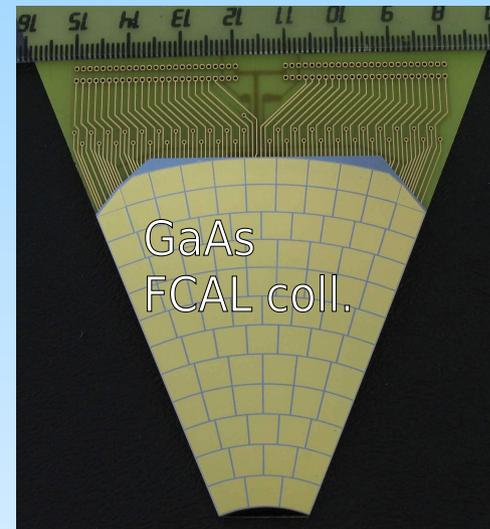


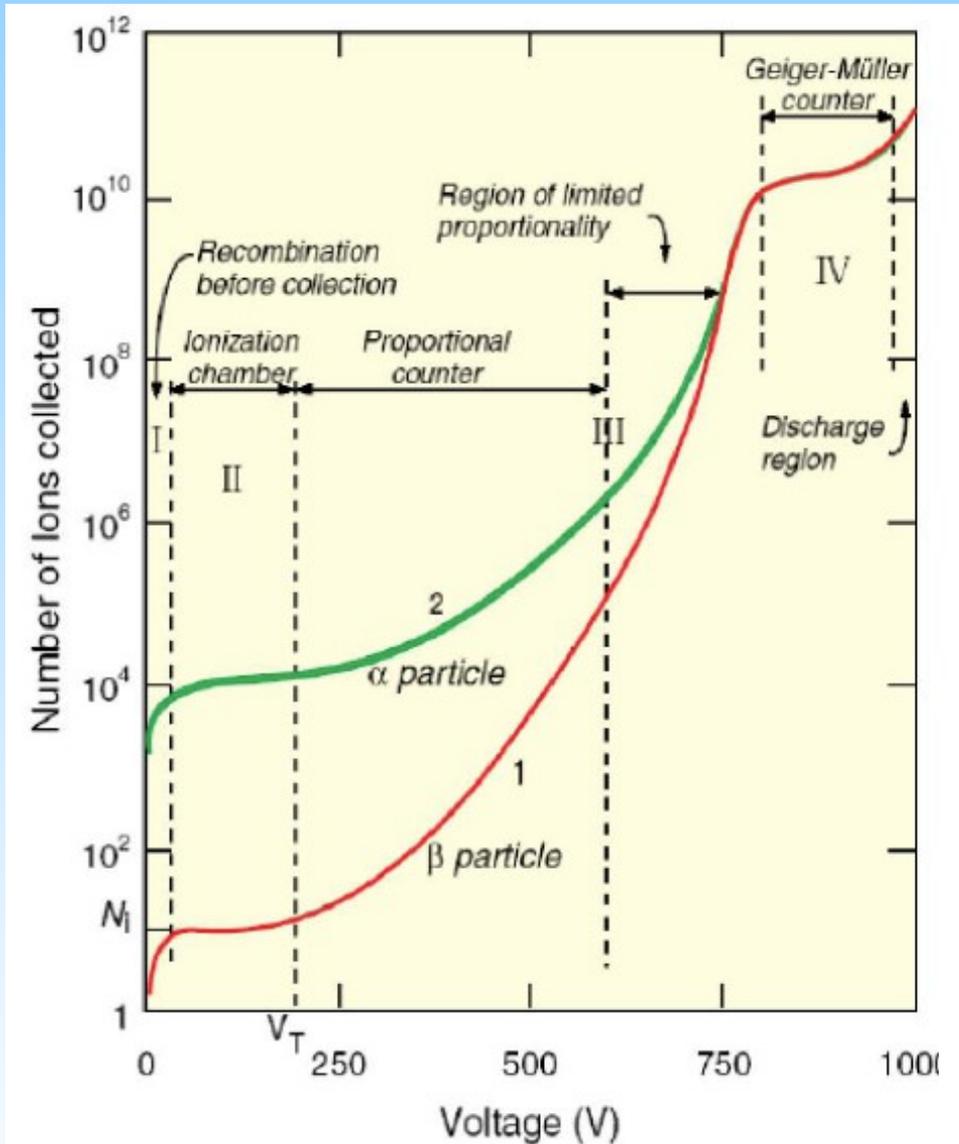
Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

# Semi-Conducteurs

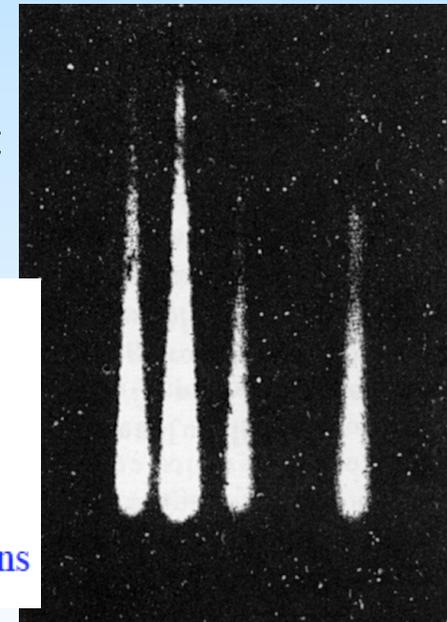
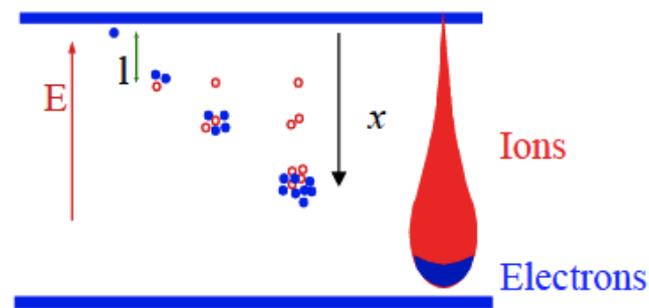
- Collection directe de charge
  - ▶ **Besoin d'1 électronique d'amplification**
- sous un potentiel élevé (qq 100 V)
  - ▶ **Silicium de haute résistance**
  - ▶ **Germanium**
  - ▶ **Diamant**
- ⊕ Très bon rendement
  - ▶  $W_{e-h} \sim \text{qq eV}$
  - ▶ **facteur de Fano → meilleur que  $1/\sqrt{N}$**
  - ▶ **Stabilité, sensibilité au mip**
- ⊖ Prix



# Détecteurs Gazeux : amplification



- Forts gains :  $10^6 - 10^7$
- Temps de récupération
  - ▶ ( $\sim 1/\text{Gain}$ )
  - ▶ Peut-être local
- Géométrie
  - ▶ **Cylindrique : Geiger**
    - ◆ Champ en  $1/r$
    - ◆  $\varnothing$  qq  $10 \mu\text{m}$
  - ▶ **Plane**
    - ◆ Champ constant
    - ◆ plusieurs zone



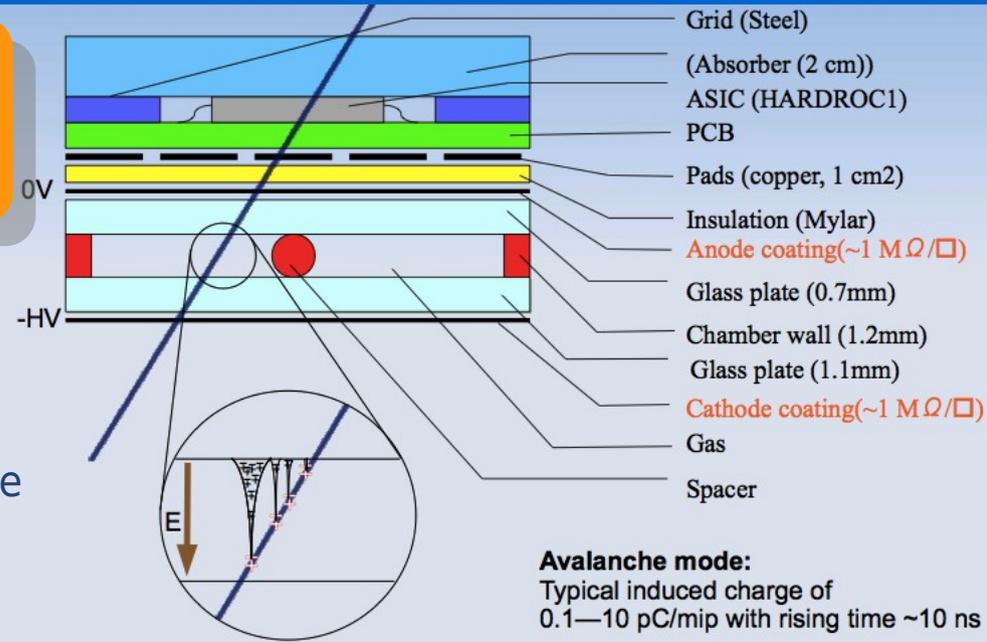
# Détecteurs gazeux



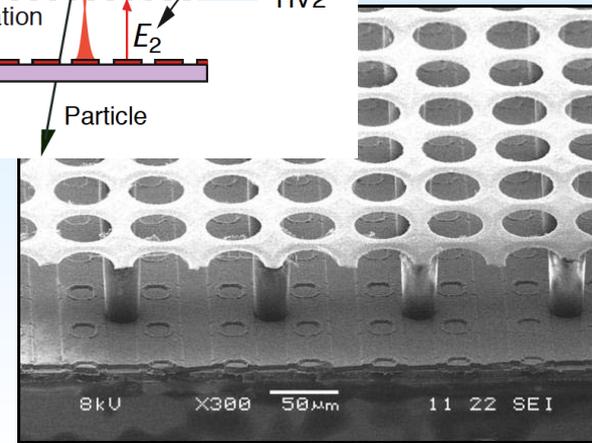
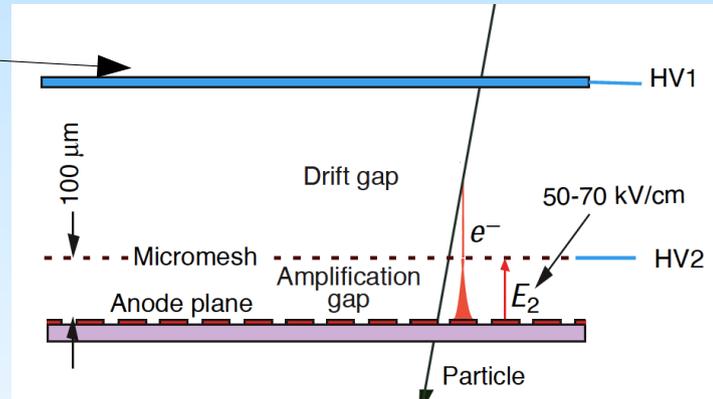
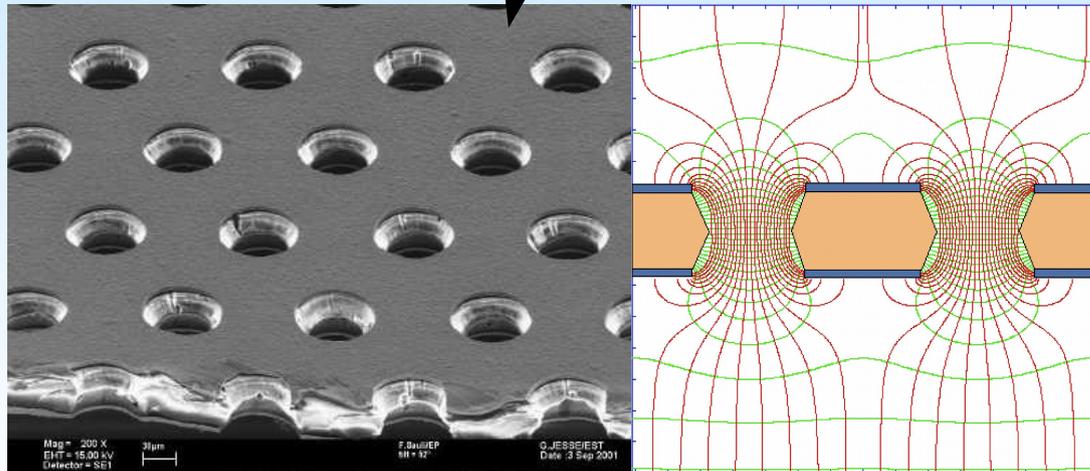
⊕ **Larges surfaces, coût**

⊖  $f_{\text{échant.}}$

- Tubes (Proportionnels, Geiger)
  - ▶ Aleph, Muons Atlas
- GRPC : (Glass) Resistive Plate Chamber
  - ▶ Muons CMS



- $\mu$ Megas
- GEMs



# Réponse en temps

| Detector Type                   | Accuracy (rms)               | Resolution Time   | Dead Time              |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------|
| Bubble chamber                  | 10–150 $\mu\text{m}$         | 1 ms              | 50 ms <sup>a</sup>     |
| Streamer chamber                | 300 $\mu\text{m}$            | 2 $\mu\text{s}$   | 100 ms                 |
| Proportional chamber            | 50–100 $\mu\text{m}^{b,c}$   | 2 ns              | 200 ns                 |
| Drift chamber                   | 50–100 $\mu\text{m}$         | 2 ns <sup>d</sup> | 100 ns                 |
| Scintillator                    | —                            | 100 ps/ $n^e$     | 10 ns                  |
| Emulsion                        | 1 $\mu\text{m}$              | —                 | —                      |
| Liquid argon drift [7]          | $\sim$ 175–450 $\mu\text{m}$ | $\sim$ 200 ns     | $\sim$ 2 $\mu\text{s}$ |
| Micro-pattern gas detectors [8] | 30–40 $\mu\text{m}$          | < 10 ns           | 20 ns                  |
| Resistive plate chamber [9]     | $\lesssim$ 10 $\mu\text{m}$  | 1–2 ns            | $\leq$ 10 ms           |
| Silicon strip                   | pitch/(3 to 7) <sup>f</sup>  | <i>g</i>          | <i>g</i>               |
| Silicon pixel                   | 2 $\mu\text{m}^h$            | <i>g</i>          | <i>g</i>               |

# Effets de saturation

- Pour les particules fortement ionisantes

- ▶ part. basse E
- ▶  $\alpha$
- ▶ fragments

- Scintillateurs

- ▶ Loi de Birks

- Gaz nobles liquéfiés

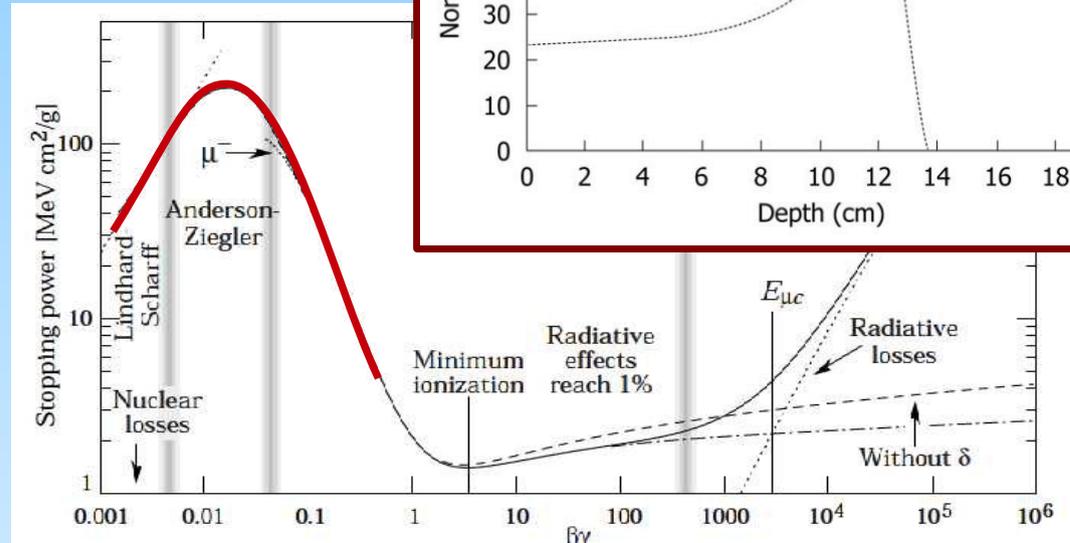
- ▶ Charge d'espace

- ◆ → recombinaison & scintillation

- Détecteurs Gazeux :

- ▶ Charge d'espace

- ◆ Limitation du gain.



## Birks' Law

- Describes the light output of organic scintillators
- Fluorescence  $S$  in general not proportional to energy loss
  - ⇒ quenching effects between excited molecules
  - with low energy electrons ( $< 125$  KeV)
  - scintillation by heavy ions  $<$  than by electrons

$$\Delta S \propto \frac{\Delta E}{1 + k_B (\Delta E / \Delta x)}$$

- $k_B$  is the Birks' constant

⇒ must be determined for each scintillator

# **Quelques exemples de détecteurs (techniques)**

# Quelques exemples de grands calorimètres

Machines basse E: CLEO, BaBar cristal Csl, ~ pas de HCAL

LEP OPAL lead glass, Fe-w.ch. L3 BGO  
ALEPH, DELPHI → Pb/Fe-wire chambers sandwich

SLC SLD Pb/Fe- $\ell$ Ar

HERA H1 Pb/Fe- $\ell$ Ar ZEUS U-scint.

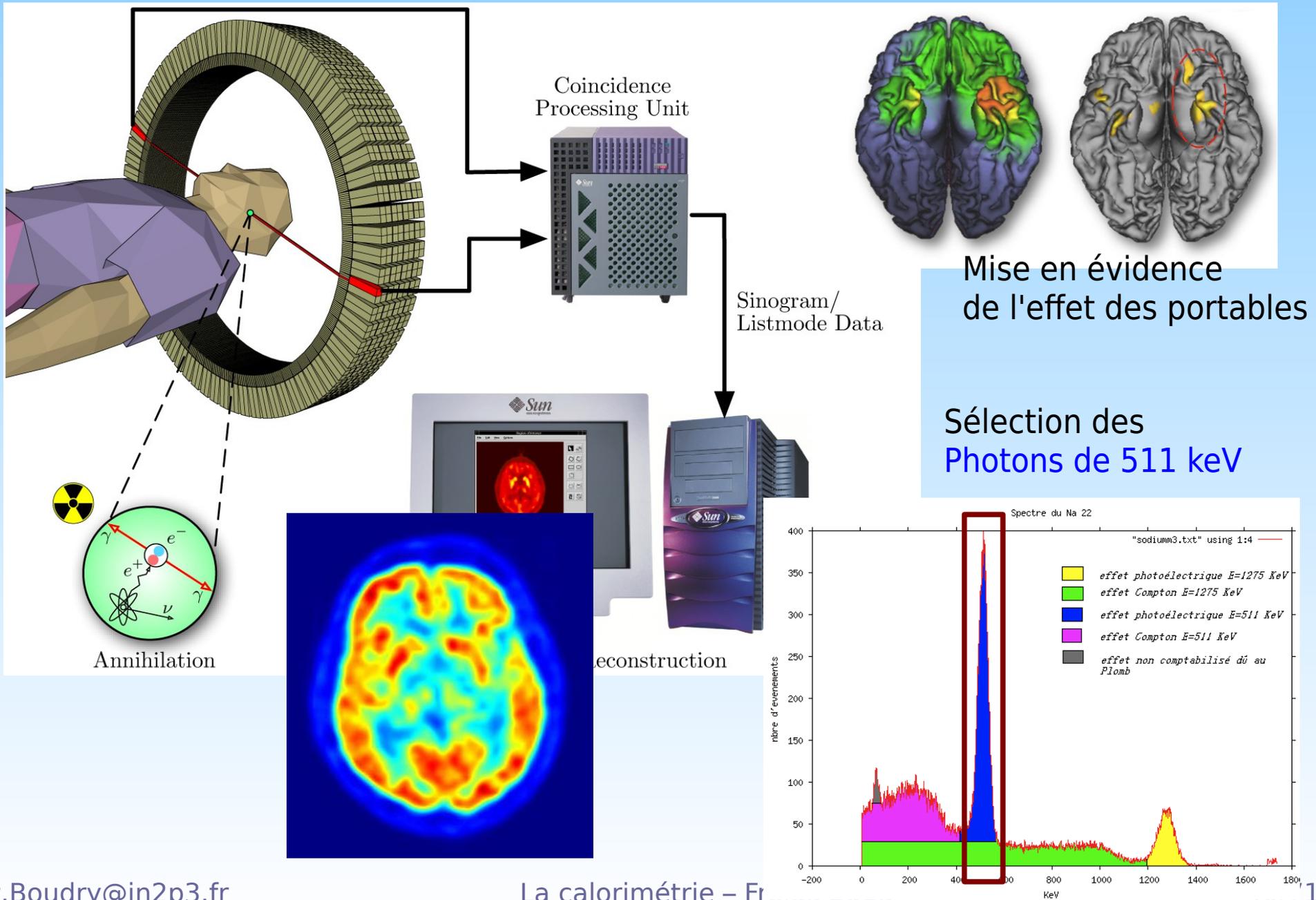
TeVatron D0 U- $\ell$ Ar CDF Pb/Fe-scint.

LHC CMS PbWO<sub>4</sub>, Fe-scintillator

ATLAS Pb- $\ell$ Ar, Fe-scintillator

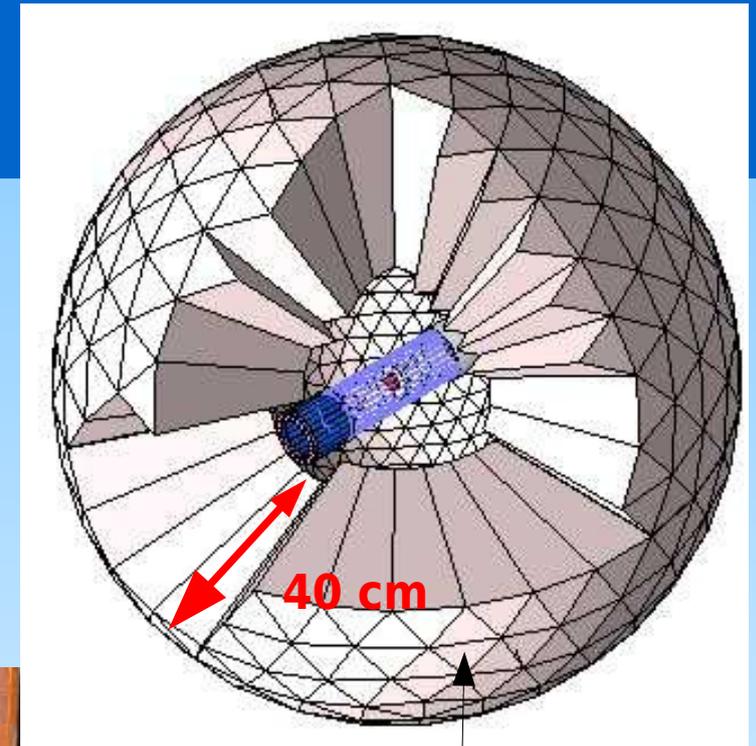
# Cristaux

# Tomographie par émission de positrons : des calos industriels...



# Crystal Ball

- 672 Cristaux de NaI(Tl) + PM
  - ▶ Couverture 93%  $4\pi$  stéradians
- $\sim 16 X_0 \rightarrow$  Photons moyenne En
- Détecteurs nomade
  - ▶ SLAC puis DESY, puis Mayence.

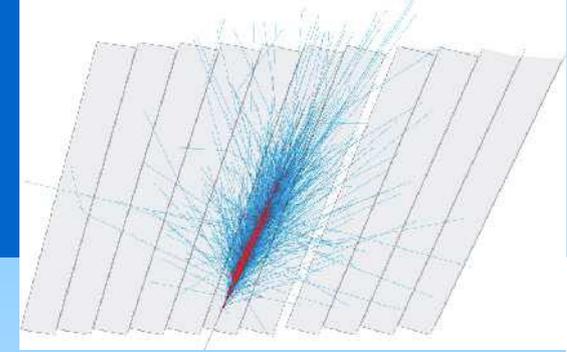


Cristaux pyramide tronquées

Tubes photomultiplicateurs

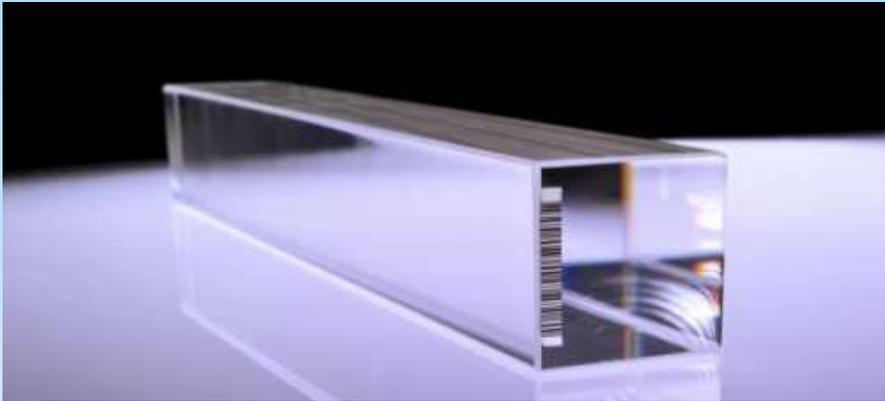


# CMS ECAL



- $\text{PbWO}_4$

- ▶  $X_0 = 0,89 \text{ cm}$  (Pb :  $0,56 \text{ cm}$ )
- ▶  $R_M = 2,2 \text{ cm}$

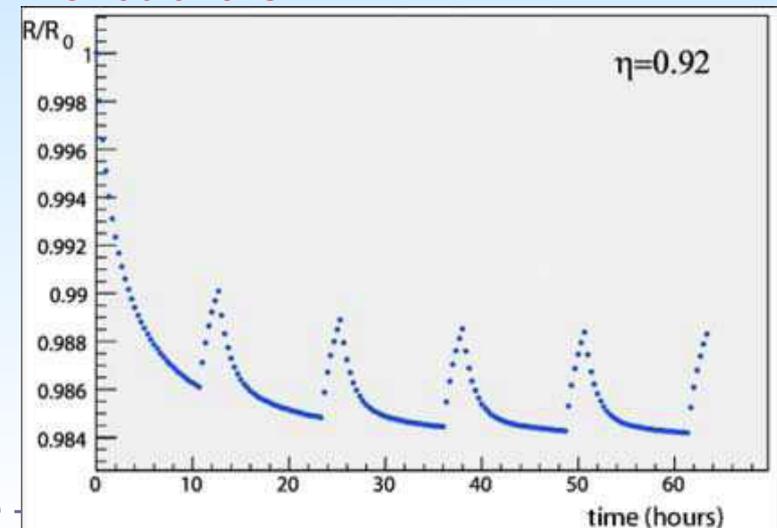
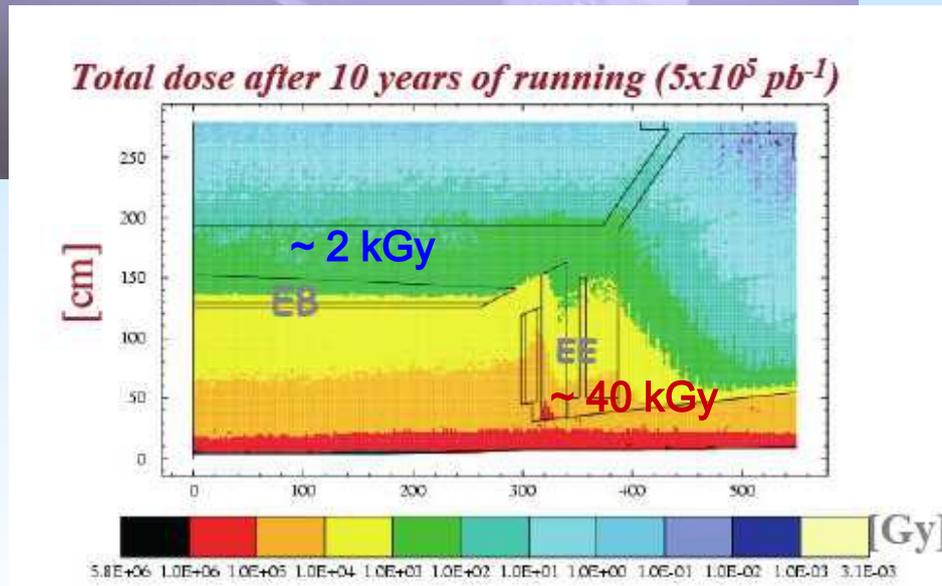


- Plus :

- ▶ Excellente résolution en E
- ▶ Calorimètre compact (longueur du cristal 23cm pour 26  $X_0$ )
- ▶ gerbe très compacte
- ▶ Rapidité (80% de la lumière  $\leq 15\text{ns}$ )
- ▶ Résistance aux radiations (105Gy)

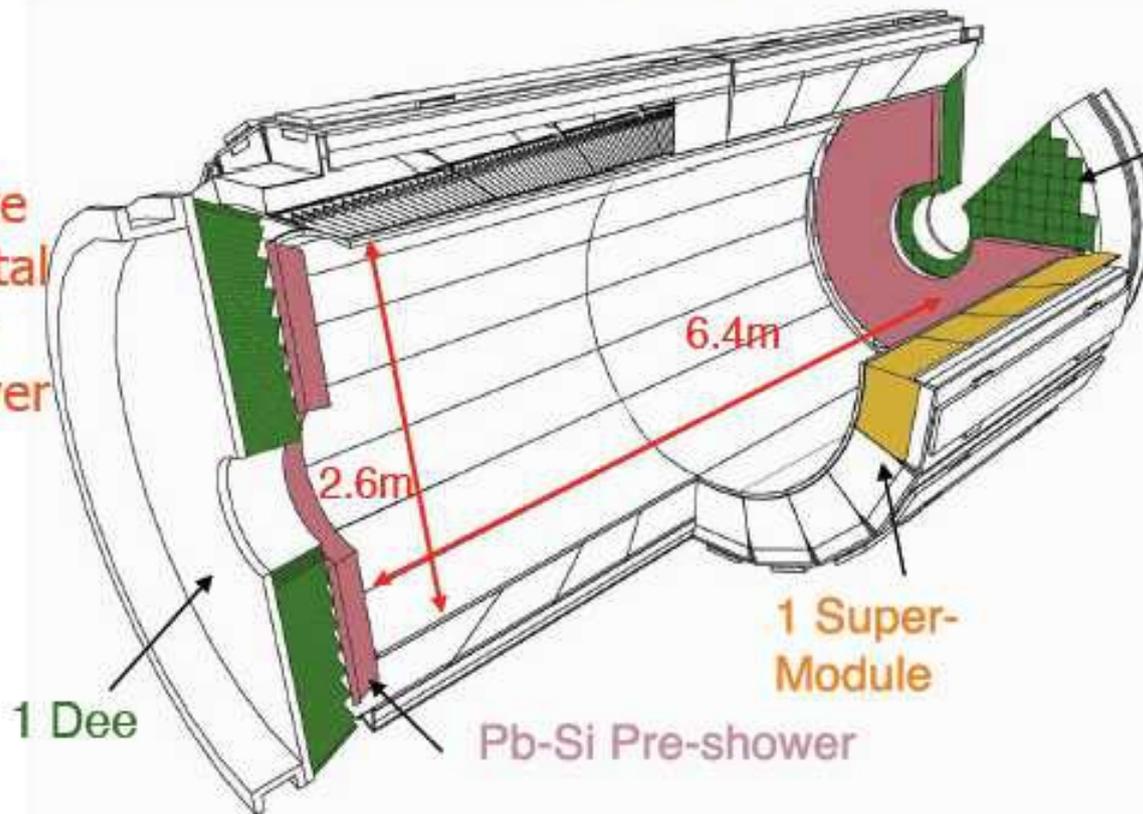
- Moins :

- ▶ Faible rendement :  $150 \gamma/\text{MeV}$
- ▶ Sensibilité à la  $t^\circ$  ( $-1,9\% / ^\circ\text{C}$ ) & radiations



# CMS ECAL (EM) design

Homogenous  
Lead Tungstate  
( $\text{PbWO}_4$ ) Crystal  
Calorimeter +  
Pb-Si Preshower



1 Endcap  
Super-Crystal

Crystals are  
projective and  
positioned  
pointing slightly  
off the IP to  
avoid cracks.



## Barrel (EB):

- 61200 crystals
- 36 Supermodules (SM),  
each 1700 crystals
- $|\eta| < 1.48$

## Endcap (EE):

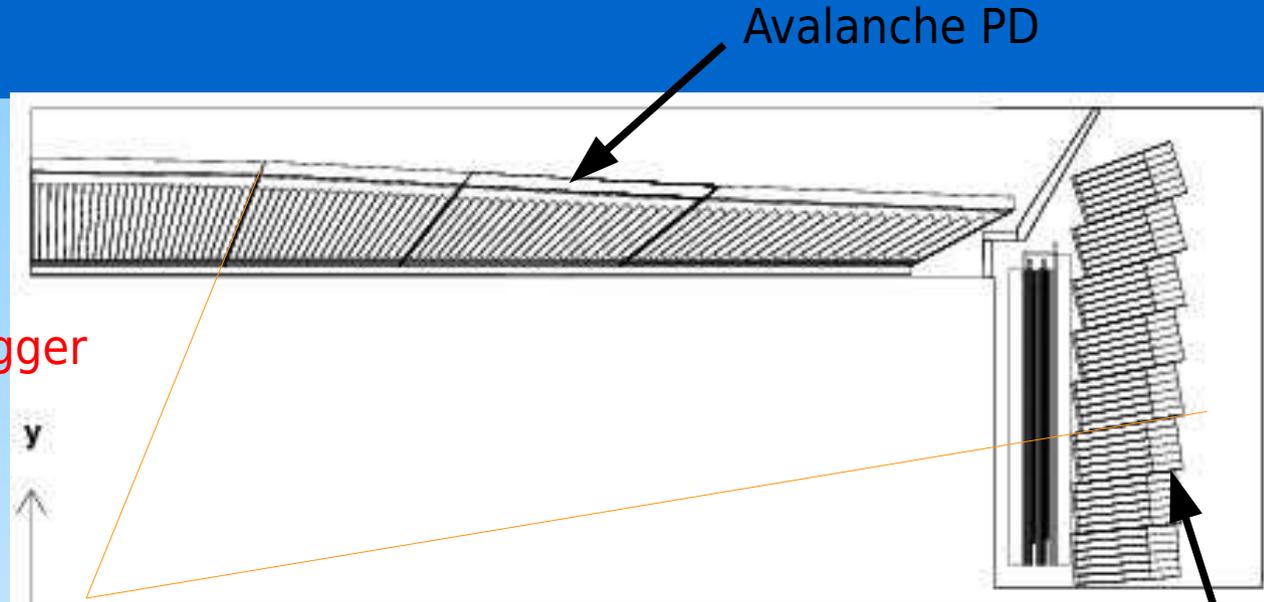
- 14648 crystals
- 4 Dees, SuperCrystals of  
5x5 xtals
- $1.48 < |\eta| < 3.0$

## Preshower (ES):

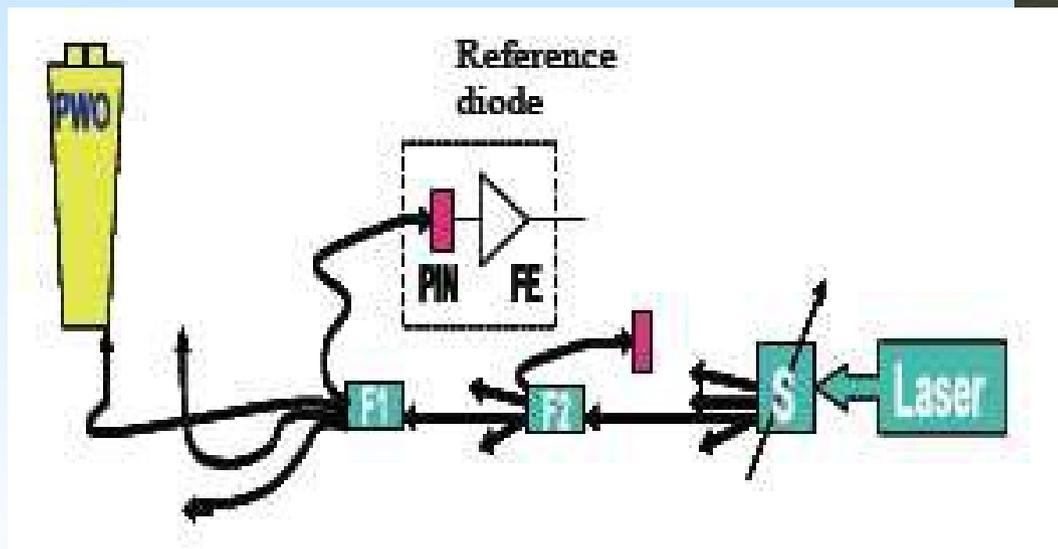
- Pb-Si
- 4 Dees
- 4300 Si strips
- $1.65 < |\eta| < 2.6$

# CMS ECAL

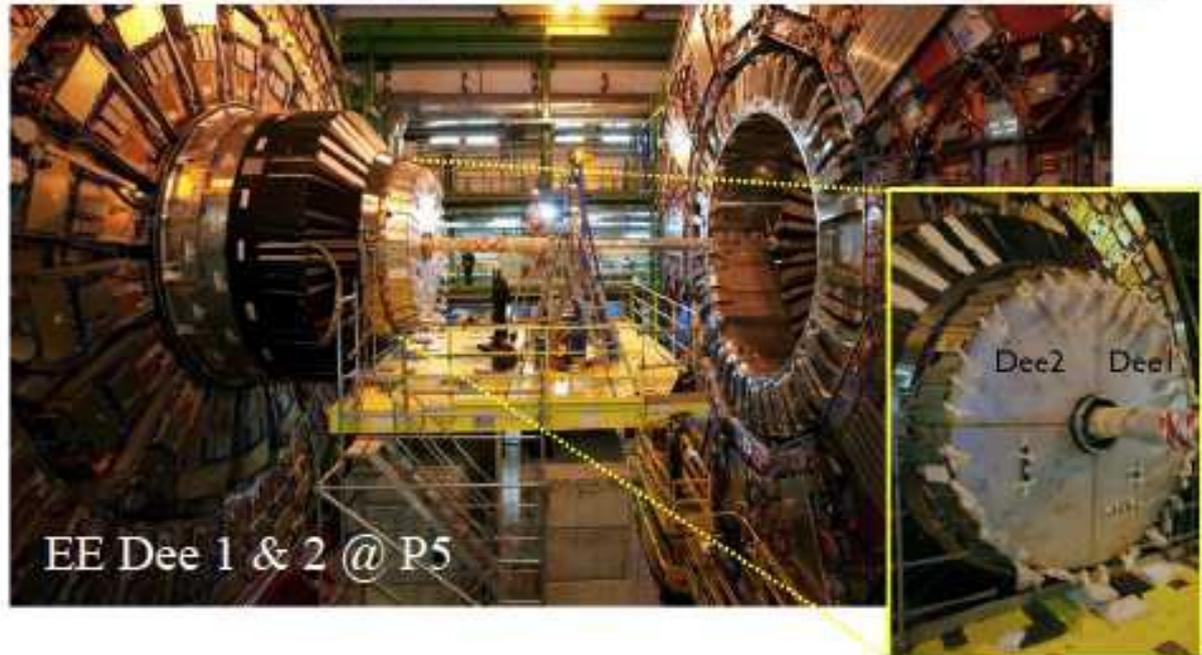
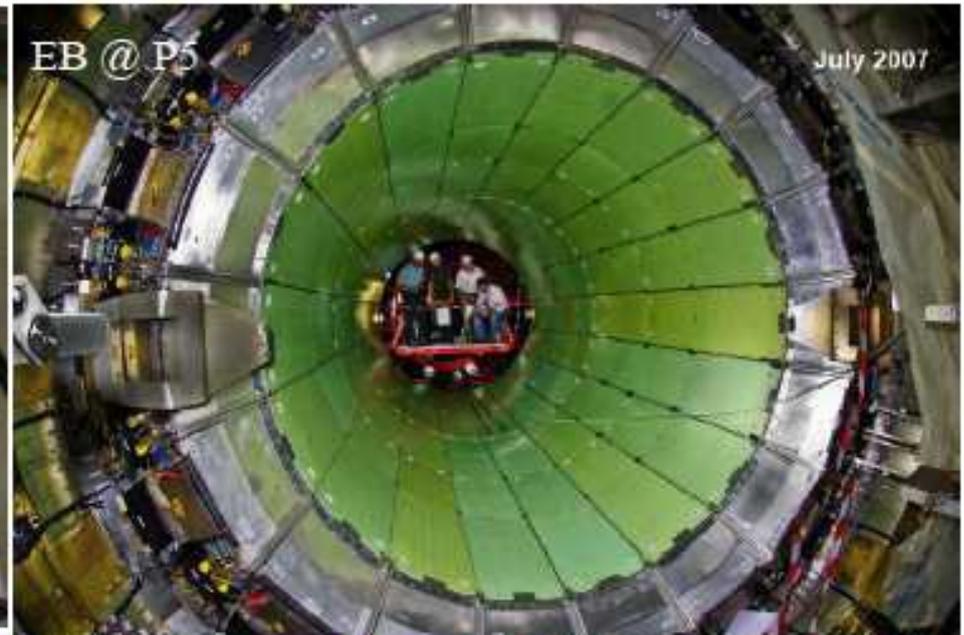
- $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 
  - ▶ 80% des  $e^-$  dans 1 crystal
  - ▶ groupe de  $3 \times 3$  pour le trigger
  - ▶ Presque pointant



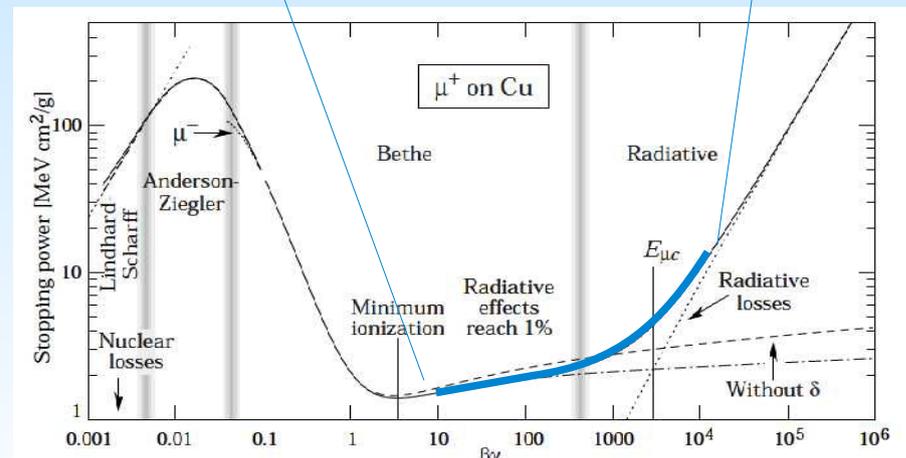
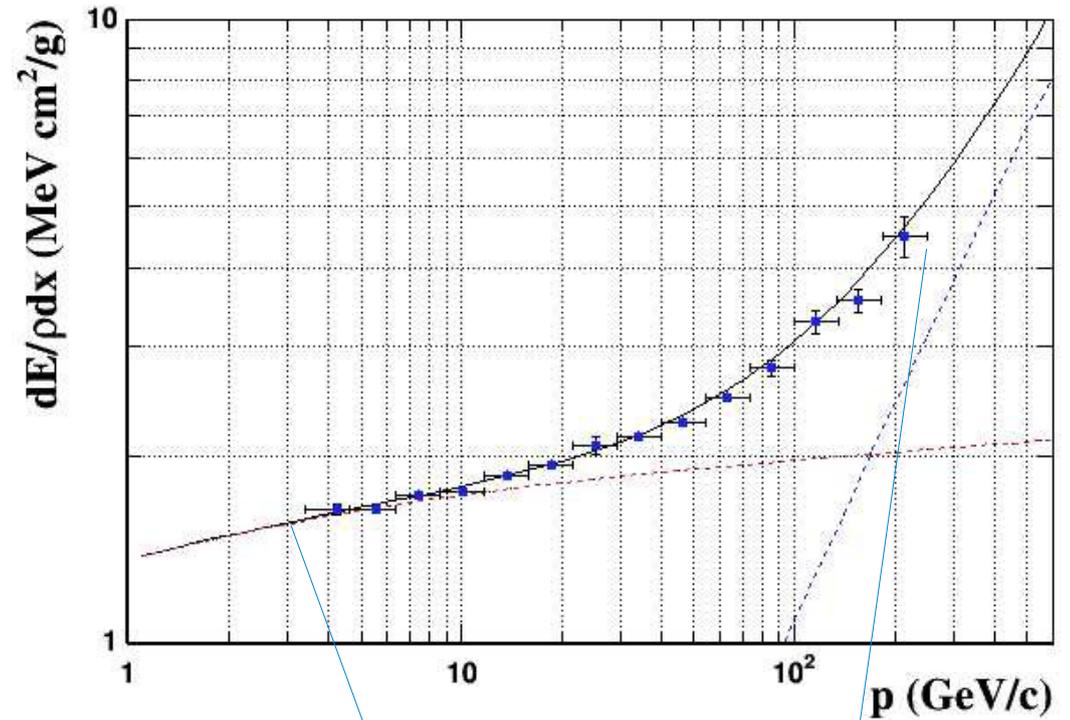
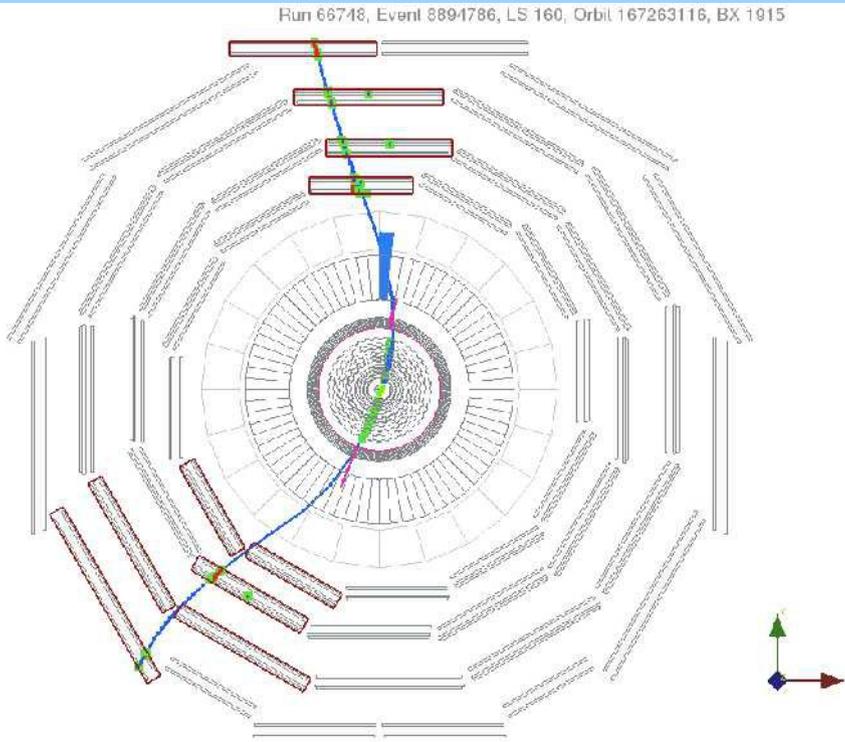
vacuum phototriodes (VPT) (RadHard)



# CMS ECAL construction



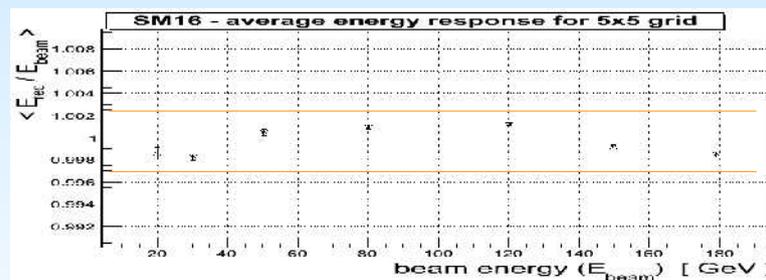
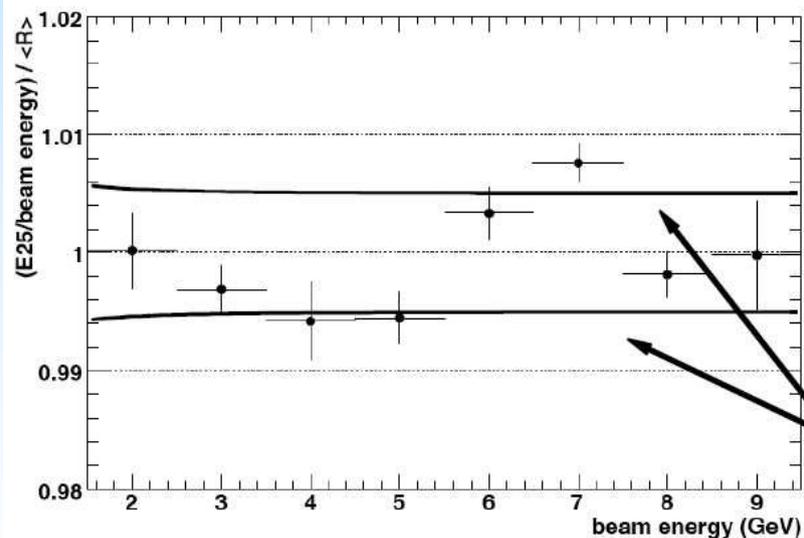
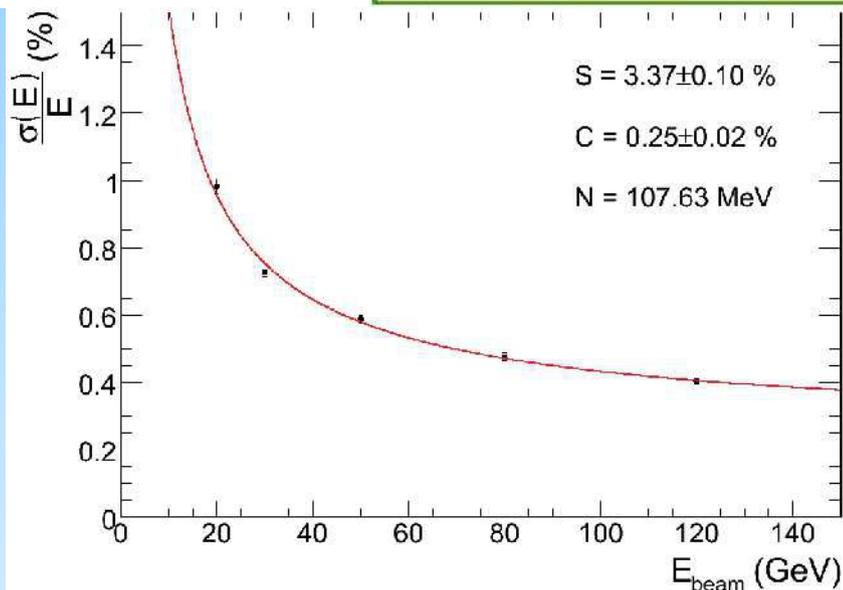
# Intercalibration tracker ↔ ECAL

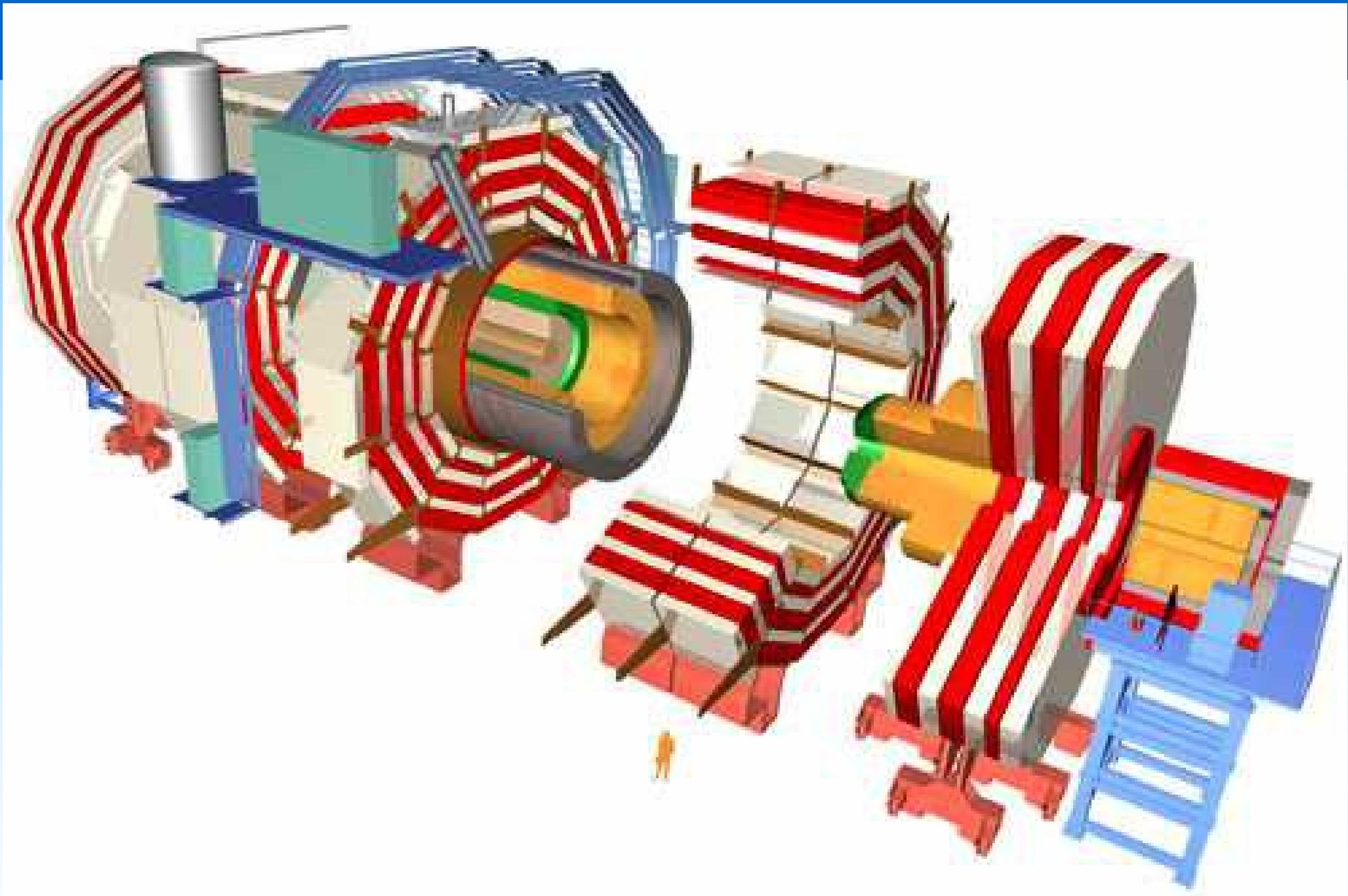


# Performances ECAL (tests en faisceau)

CMS (PbWO<sub>4</sub>)

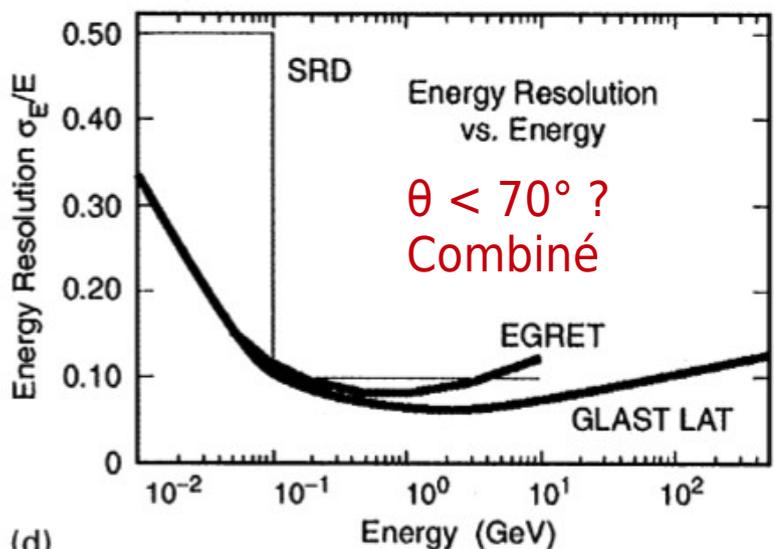
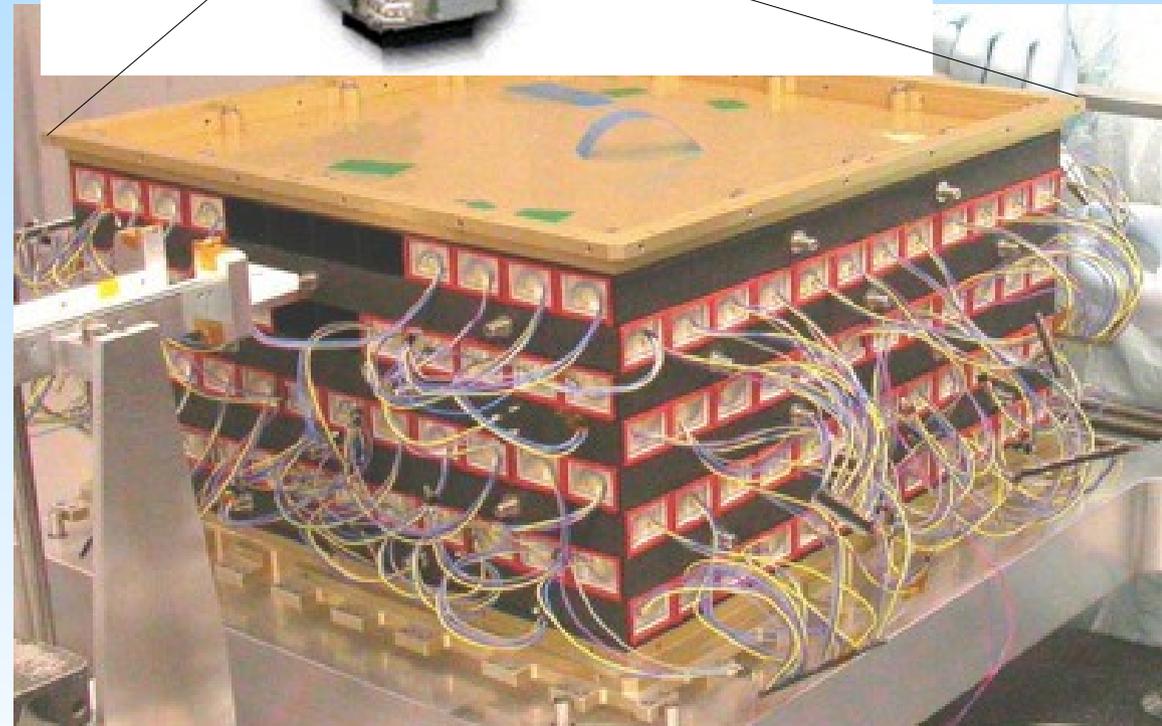
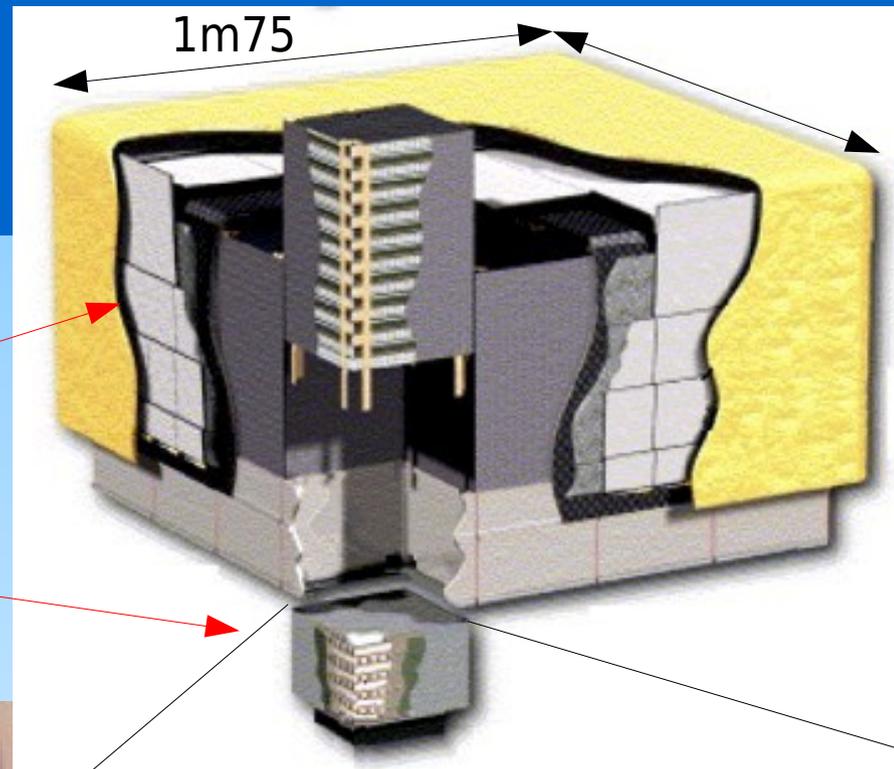
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.03}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.005$$





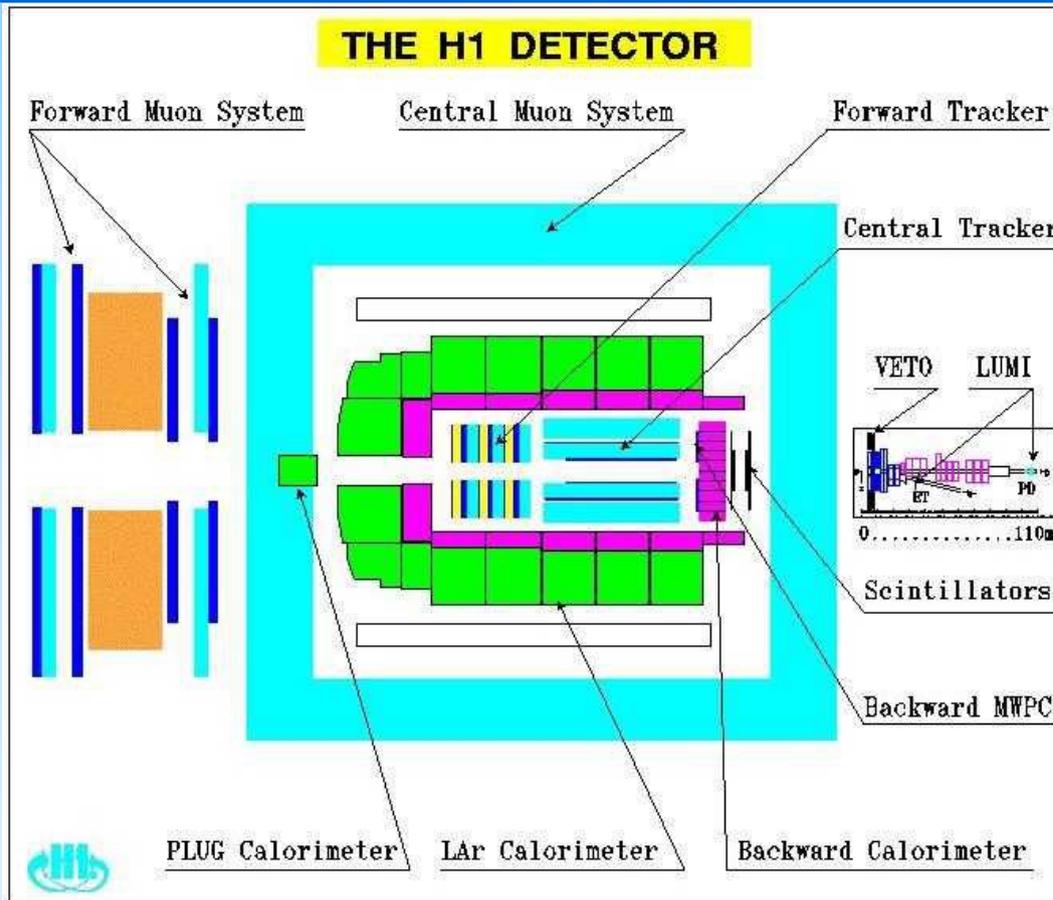
# Fermi/Glast

- Satellite observation  $\gamma$  de HE
  - ▶ 20 MeV  $< E_\gamma <$  300 GeV
- LAT = Large Area Telescope
- ECAL
  - ▶ 8 couches de CsI
    - ◆ 8,5  $X_0 \rightarrow$  fuites
    - ◆ Orientation alterné
  - ▶ Lecture double : APD
    - ◆ reconstruction pos.
    - ◆ correction attenuation



# Gas nobles liquéfiés

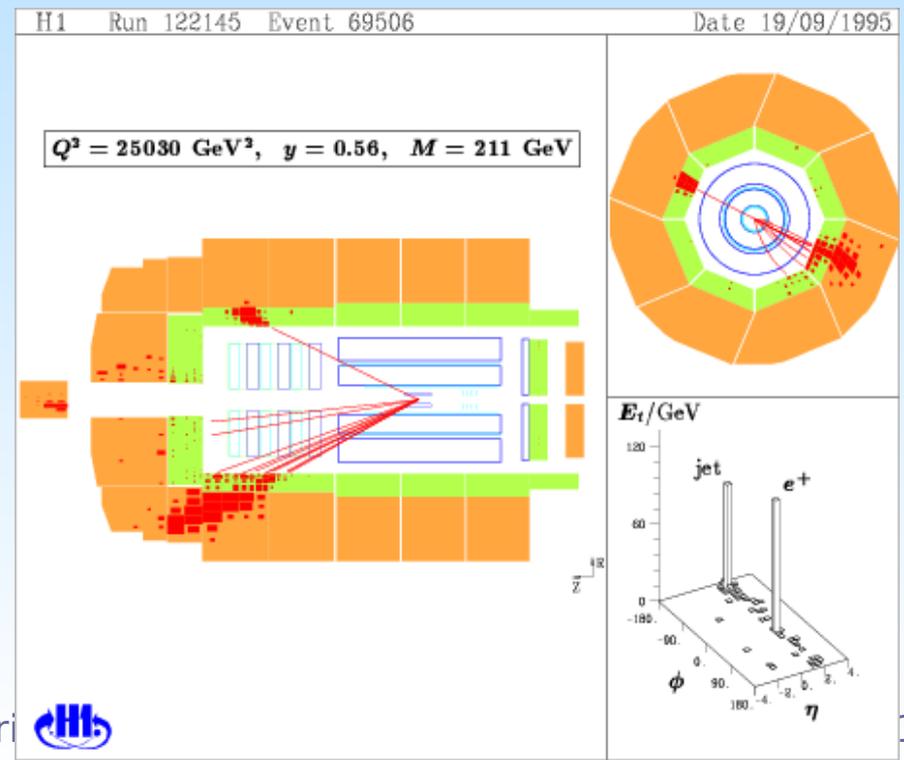
# H1 un détecteur de HERA (asymétrique)



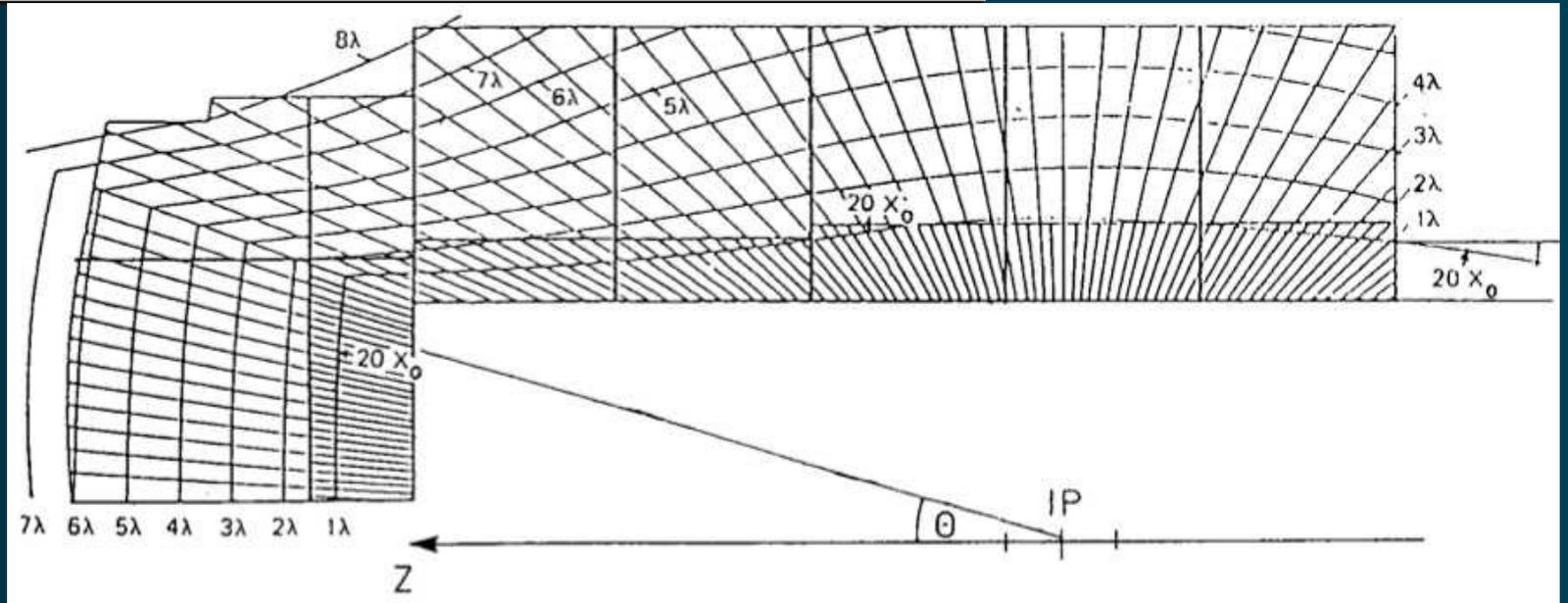
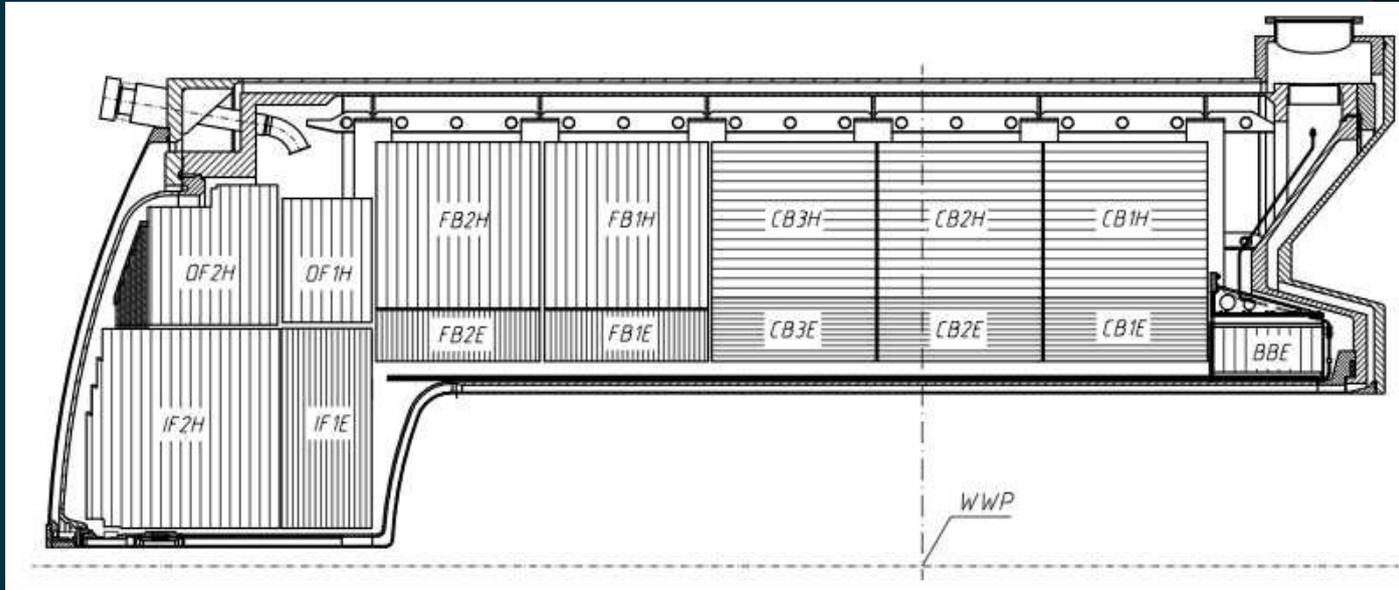
Collisions à HERA  
(DESY, Hambourg)

$e^+ p$

30 → ← 900 GeV

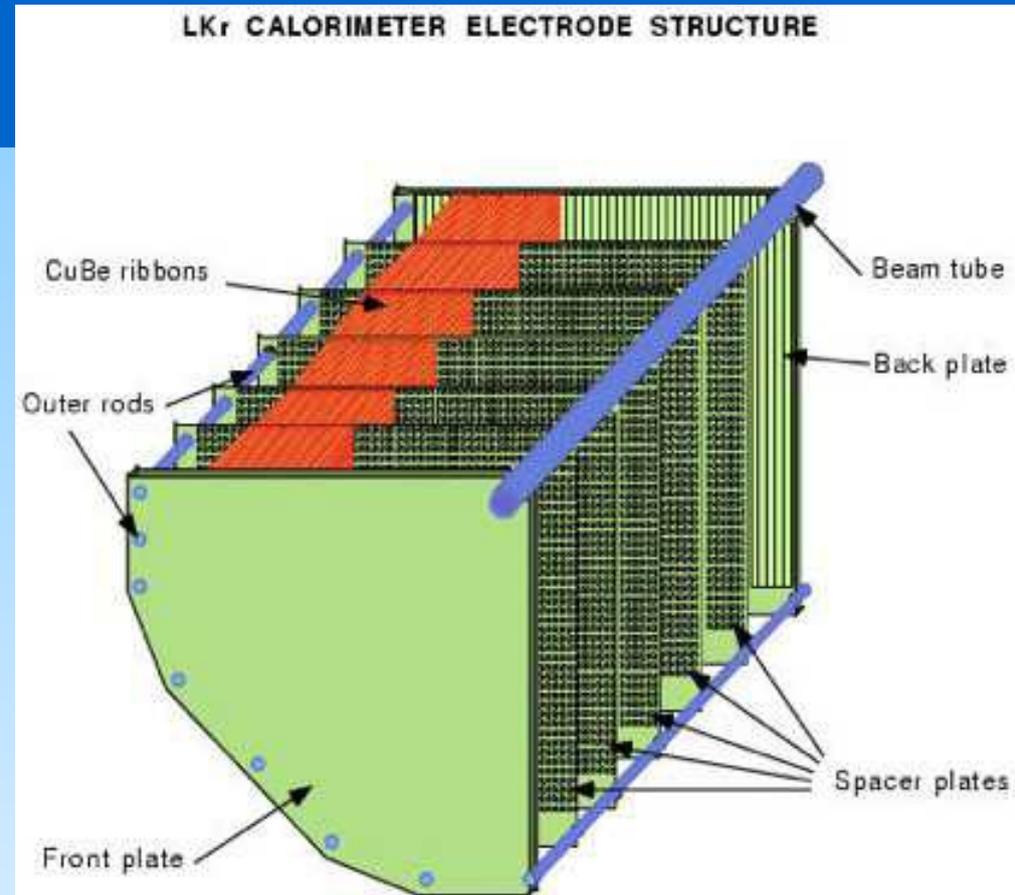
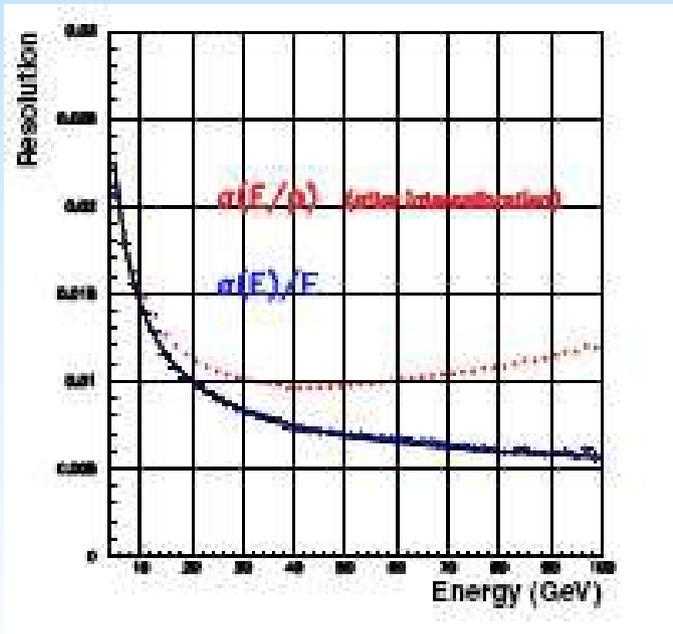


# Calorimètre $\ell$ Ar de H1



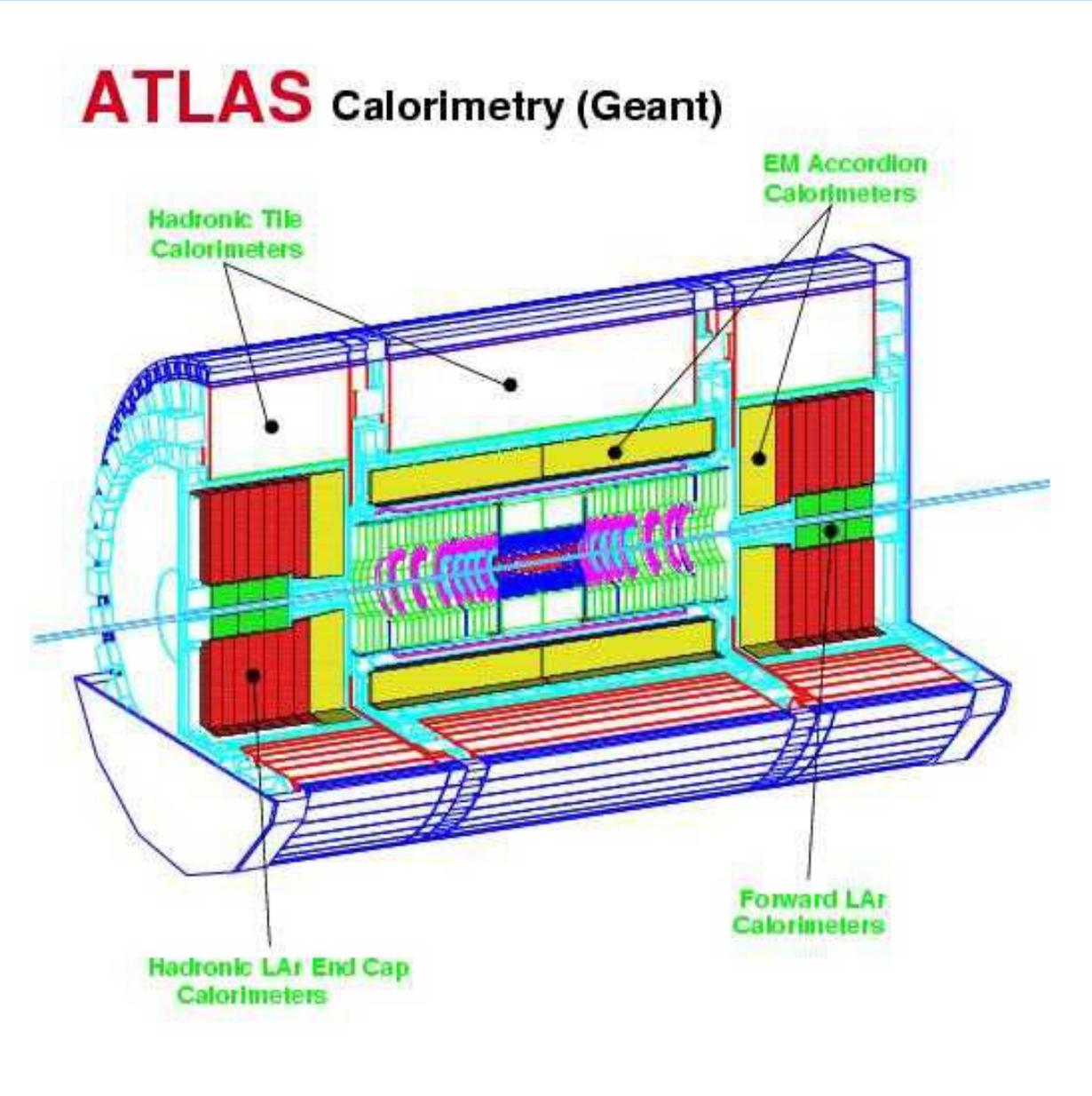
# NA48

- Expérience cible fixe (CERN)
  - Physique du K
- $\ell$ Kr @ 120°K
- Electrodes en accordéon
- $\sigma(t) \sim 220$  ps
  - temps de vol.

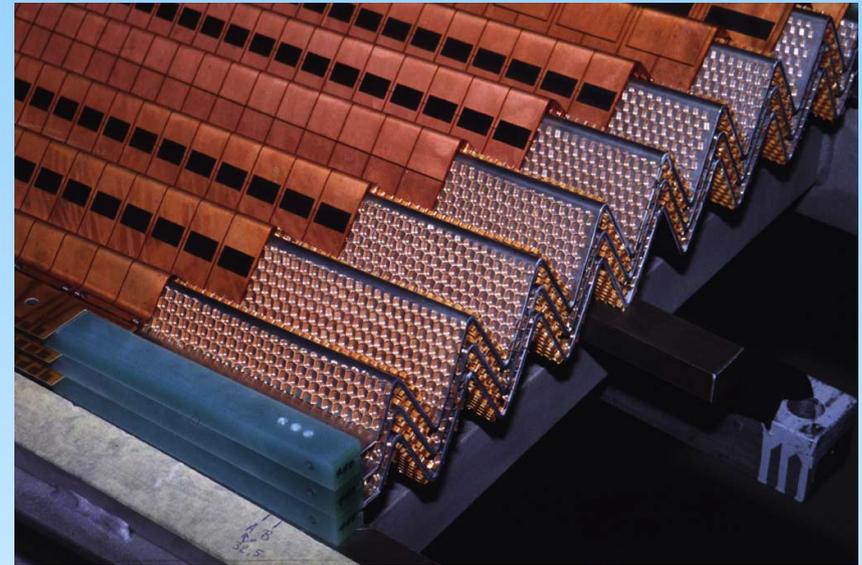
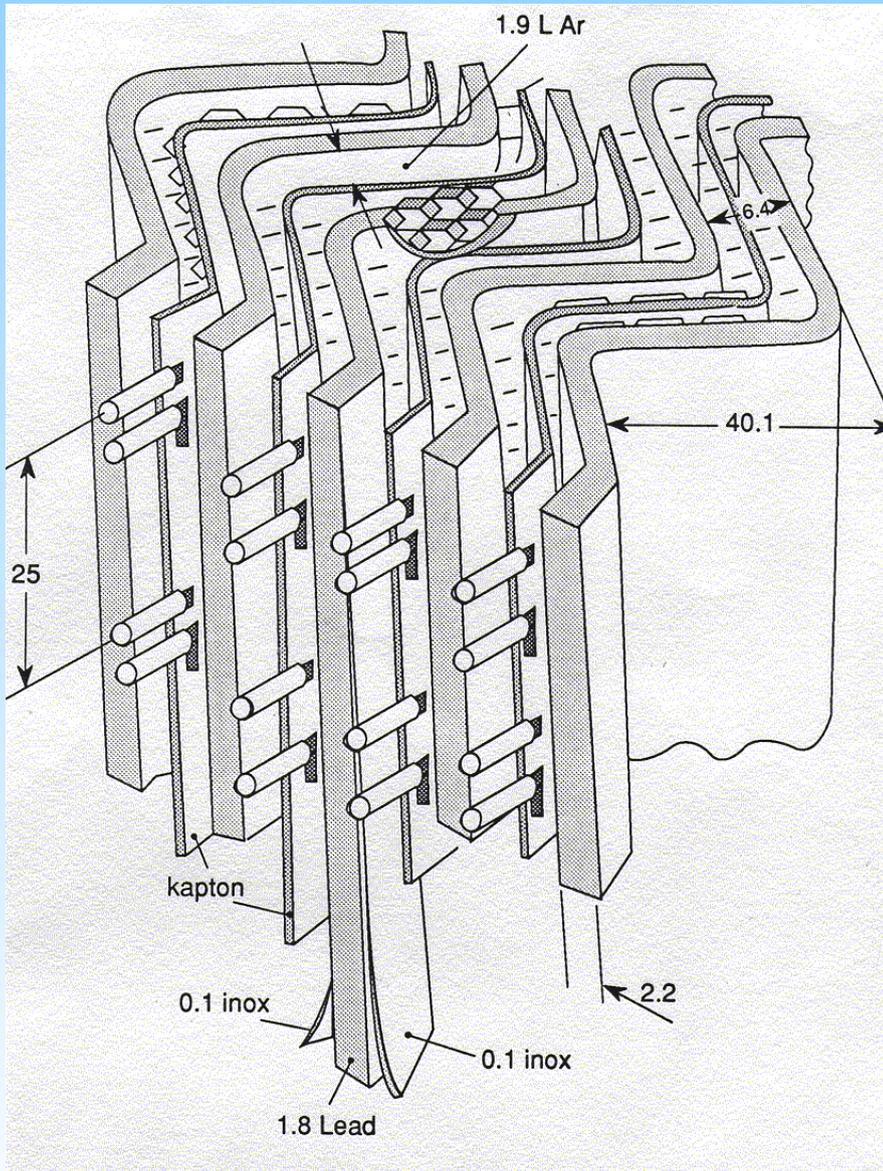


$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(3.2 \pm 0.2)\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{(0.09 \pm 0.01)}{E} \oplus (0.42 \pm 0.05)\%$$

# ECAL d'ATLAS

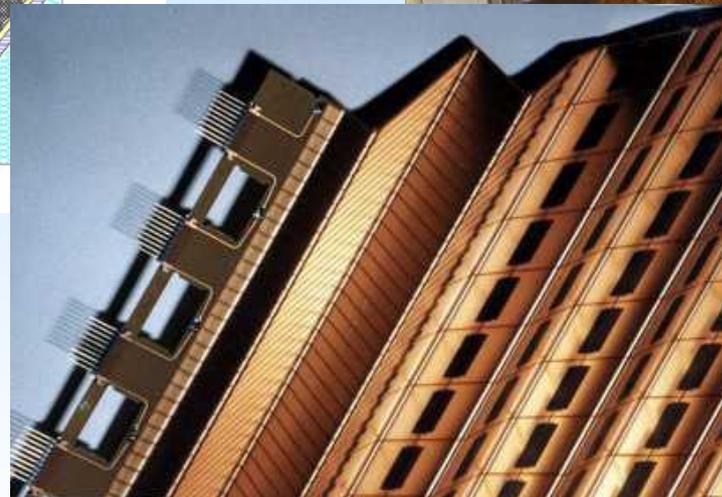
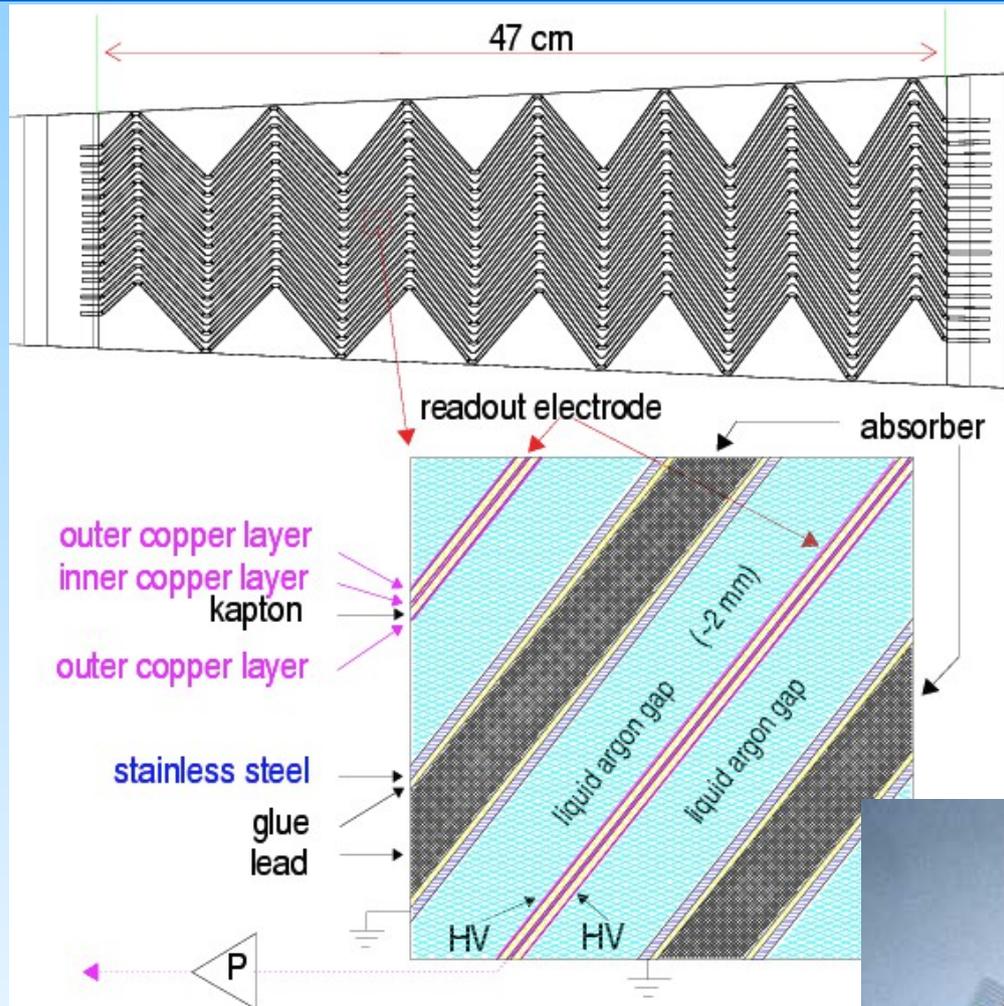


# Atlas ECAL : $\ell$ Ar

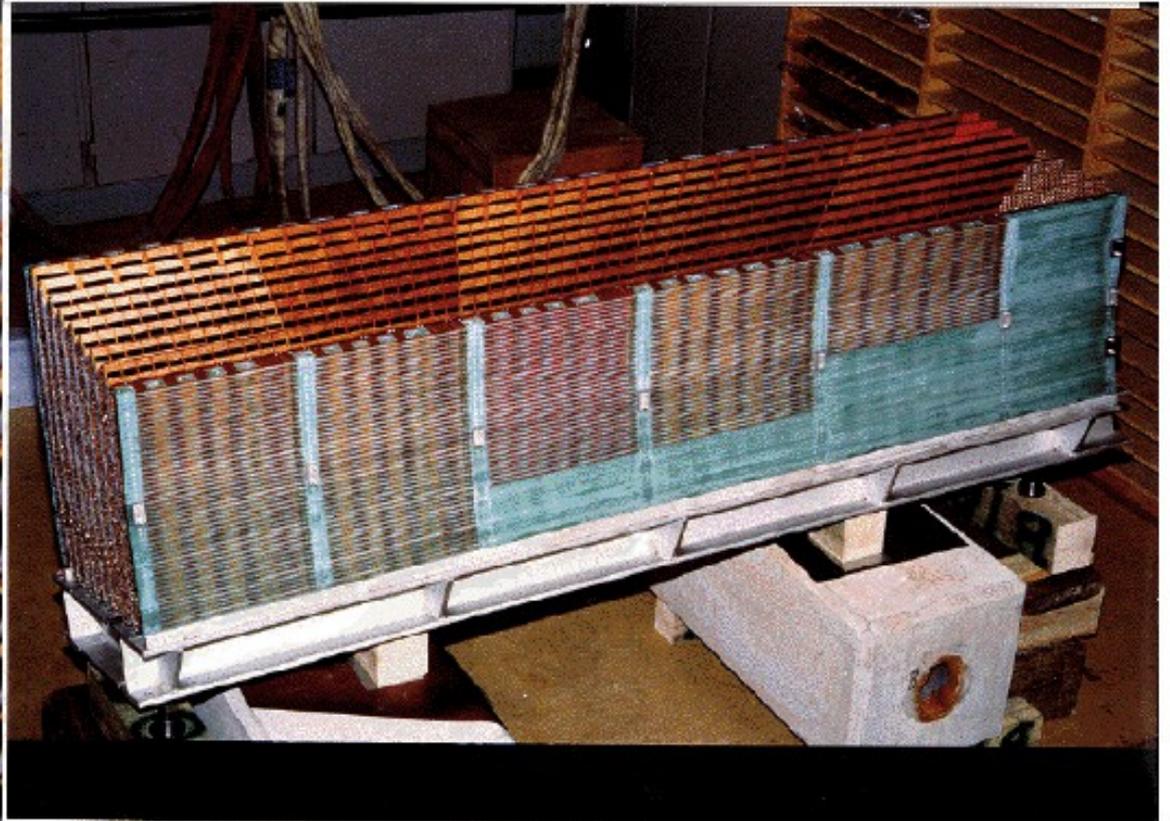


- Pbm : Temps de dérive long dans  $\ell$ Ar
- Idée : faire de petits espaces de dérive
  - ▶ Ar «lourd» →  $f_{\text{échant.}}$  OK
  - ▶ → signal 40 ns
    - ◆ ↔ 20 ns inter-paquet nom. de LHC

# Atlas ECAL

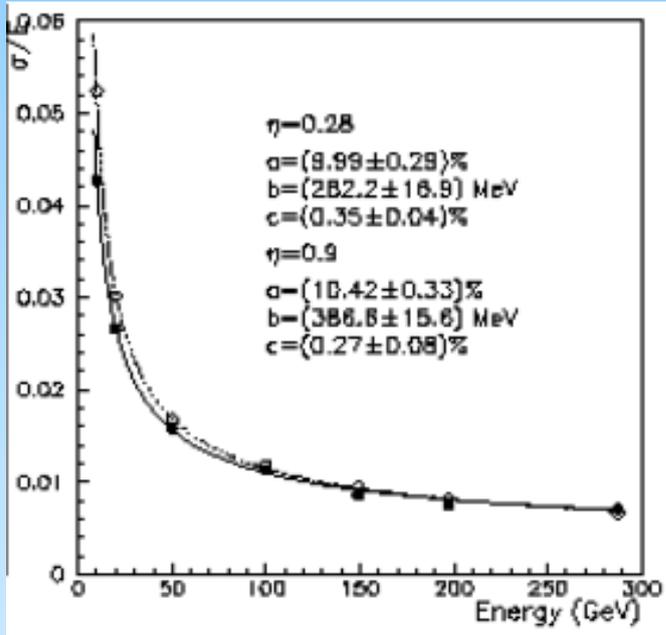


## *Accordion barrel*



2  $\pi$  detector with no cracks or gaps, no cables inside the detector

# Atlas ECAL : performances



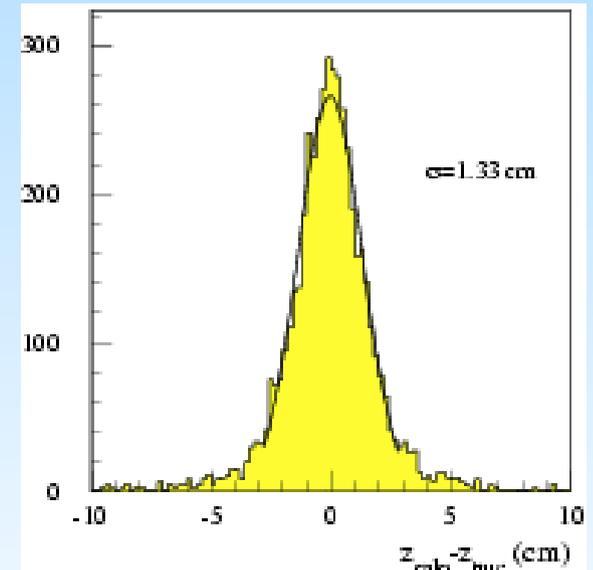
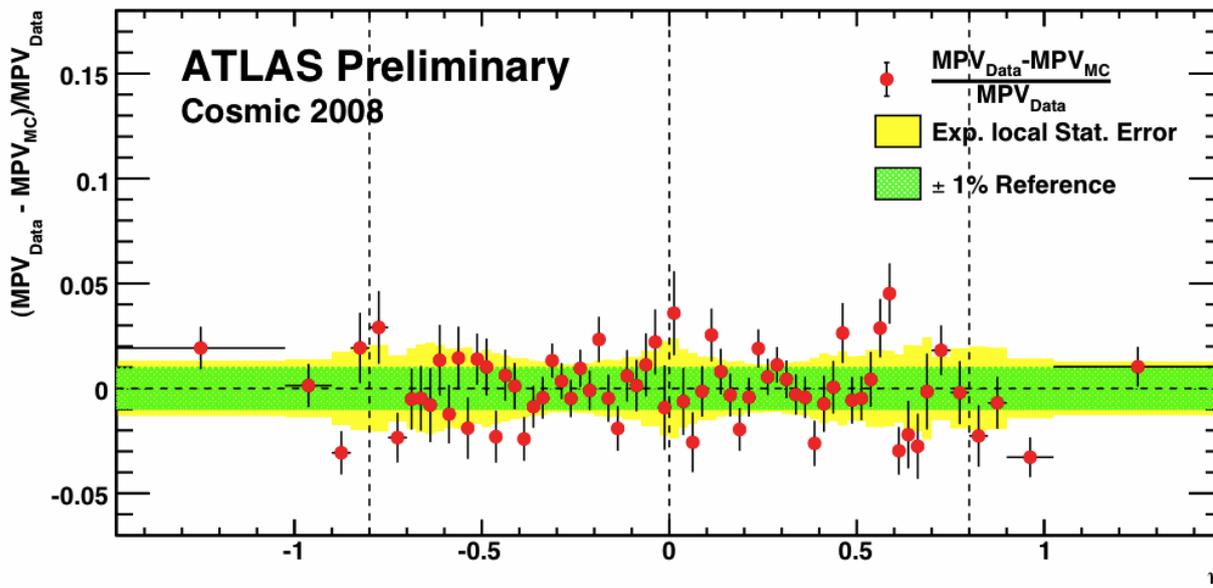
ATLAS (LARG)

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.1}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.007$$

Signal :  $H \rightarrow \gamma\gamma$   
 Bruit :  $pp \rightarrow X + \pi^0$   
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

3 long segmentations :  
 → Reconstruction de l'angle :  
 $\sigma() = 50 \text{ mrad} / \sqrt{E}$

intercalibration

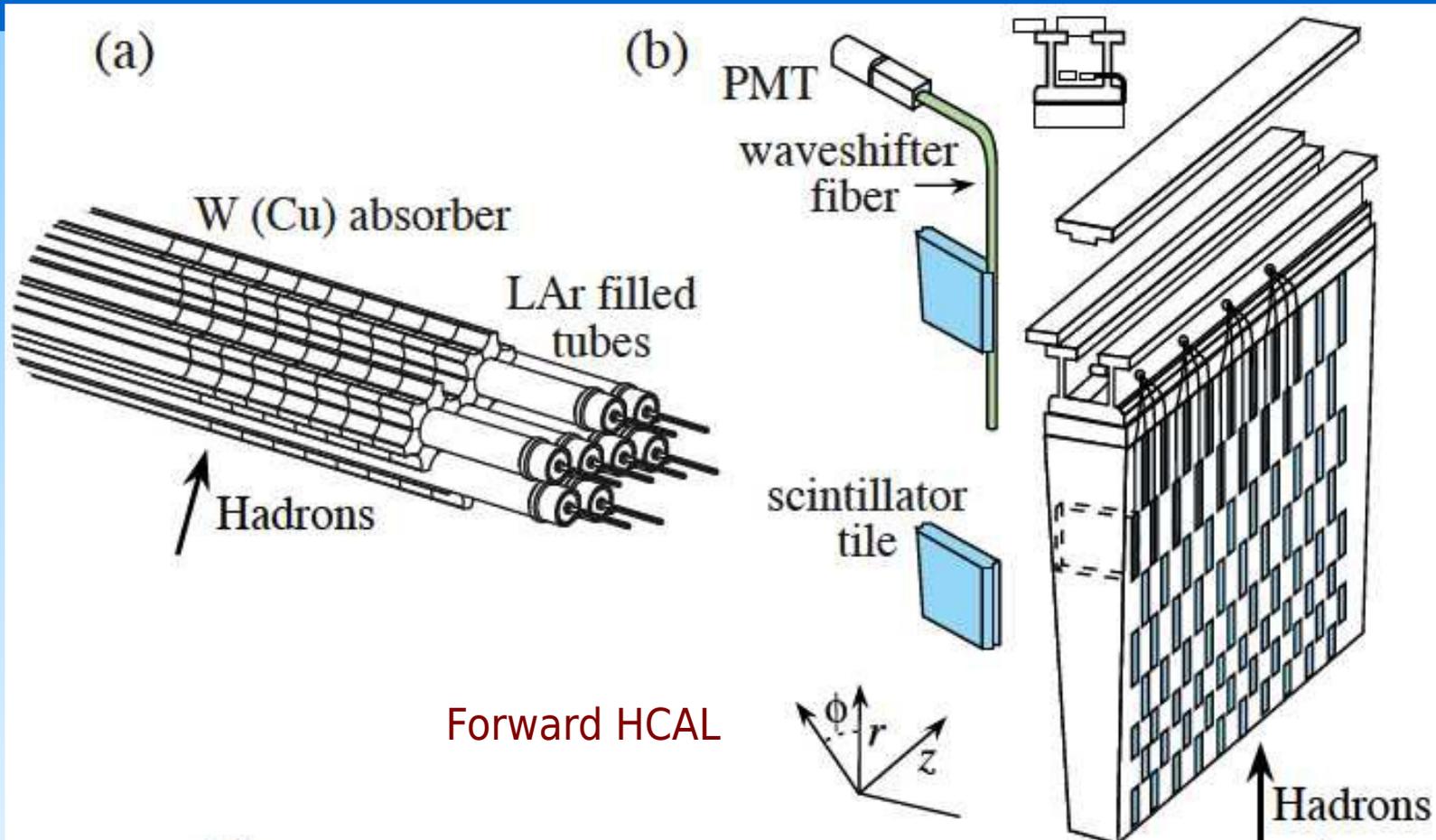


# Quelques performances de ECAL

| Technology (Experiment)                                    | Depth              | Energy resolution                             | Date |
|--|--------------------|---|------|
| NaI(Tl) (Crystal Ball)                                     | $20X_0$            | $2.7\%/E^{1/4}$                               | 1983 |
| Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BGO) (L3) | $22X_0$            | $2\%/ \sqrt{E} \oplus 0.7\%$                  | 1993 |
| CsI (KTeV)   | $27X_0$            | $2\%/ \sqrt{E} \oplus 0.45\%$                 | 1996 |
| CsI(Tl) (BaBar)  | $16\text{--}18X_0$ | $2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$                  | 1999 |
| CsI(Tl) (BELLE)  | $16X_0$            | 1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV                 | 1998 |
| PbWO <sub>4</sub> (PWO) (CMS)                              | $25X_0$            | $3\%/ \sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$     | 1997 |
| Lead glass (OPAL)  | $20.5X_0$          | $5\%/ \sqrt{E}$                               | 1990 |
| Liquid Kr (NA48)   | $27X_0$            | $3.2\%/ \sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$ | 1998 |
| Scintillator/depleted U<br>(ZEUS)                          | $20\text{--}30X_0$ | $18\%/ \sqrt{E}$                              | 1988 |
| Scintillator/Pb (CDF)                                      | $18X_0$            | $13.5\%/ \sqrt{E}$                            | 1988 |
| Scintillator fiber/Pb<br>spaghetti (KLOE)                  | $15X_0$            | $5.7\%/ \sqrt{E} \oplus 0.6\%$                | 1995 |
| Liquid Ar/Pb (NA31)  | $27X_0$            | $7.5\%/ \sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$   | 1988 |
| Liquid Ar/Pb (SLD)   | $21X_0$            | $8\%/ \sqrt{E}$                               | 1993 |
| Liquid Ar/Pb (H1)  | $20\text{--}30X_0$ | $12\%/ \sqrt{E} \oplus 1\%$                   | 1998 |
| Liquid Ar/depl. U (DØ)                                     | $20.5X_0$          | $16\%/ \sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$    | 1993 |
| Liquid Ar/Pb accordion<br>(ATLAS)                          | $25X_0$            | $10\%/ \sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$    | 1996 |

# HCAL CMS & Atlas

# ATLAS HCAL



Barrel HCAL  
Fe + Plastic  
+ WLS

En test en faisceau de  $\pi$ :  $52.9\%/ \sqrt{E} \oplus 5.7\%$

# HCAL : CMS & Atlas

|  | ATLAS   | CMS                                    |
|--|---|--|
| <b>Technology</b>  |   |  |
| Barrel / Ext. Barrel   | 14 mm iron / 3 mm scint.                            | 50 mm brass / 4 mm scint.              |
| End-caps   | 25 mm (front) - 50 mm (back) copper / 8.5 mm LAr    | 80 mm brass / 4 mm scint.              |
| Forward  | Copper (front) - Tungsten (back) 0.25 - 0.50 mm LAr | 4.4 mm steel / 0.6 mm quartz           |
| <b># Channels</b>  |   |  |
| Barrel / Ext. Barrel   | 9852  | 2592                                   |
| End-caps   | 5632  | 2592                                   |
| Forward  | 3524  | 1728                                   |
| <b>Granularity (<math>\Delta\eta \times \Delta\phi</math>)</b> |   |  |
| Barrel / Ext. Barrel   | 0.1 x 0.1 to 0.2 x 0.1                              | 0.087 x 0.087                          |
| End-caps   | 0.1 x 0.1 to 0.2 x 0.2                              | 0.087 x 0.087 to 0.35 x 0.028          |
| Forward  | 0.2 x 0.2   | 0.175 x 0.175                          |
| <b># Longitudinal Samplings</b>                                |   |  |
| Barrel / Ext. Barrel   | Three   | One                                    |
| End-caps   | Four  | Two                                    |
| Forward  | Three   | Two                                    |
| <b>Absorption lengths</b>                                      |   |  |
| Barrel / Ext. Barrel   | 9.7 - 13.0  | 5.8 - 10.3<br>10 - 14 (with Coil / HO) |
| End-caps   | 9.7 - 12.5  | 9.0 - 10.0                             |
| Forward  | 9.5 - 10.5  | 9.8                                    |

TB single  $\pi$ : 52.9%/ $\sqrt{E} \oplus 5.7\%$

Single  $\pi$  ECAL+HCAL : 110%/ $\sqrt{E} \oplus 7.3\%$   
84.7% /  $\sqrt{E} \oplus 7.4\%$  corrected for ECAL/HCAL non lin.

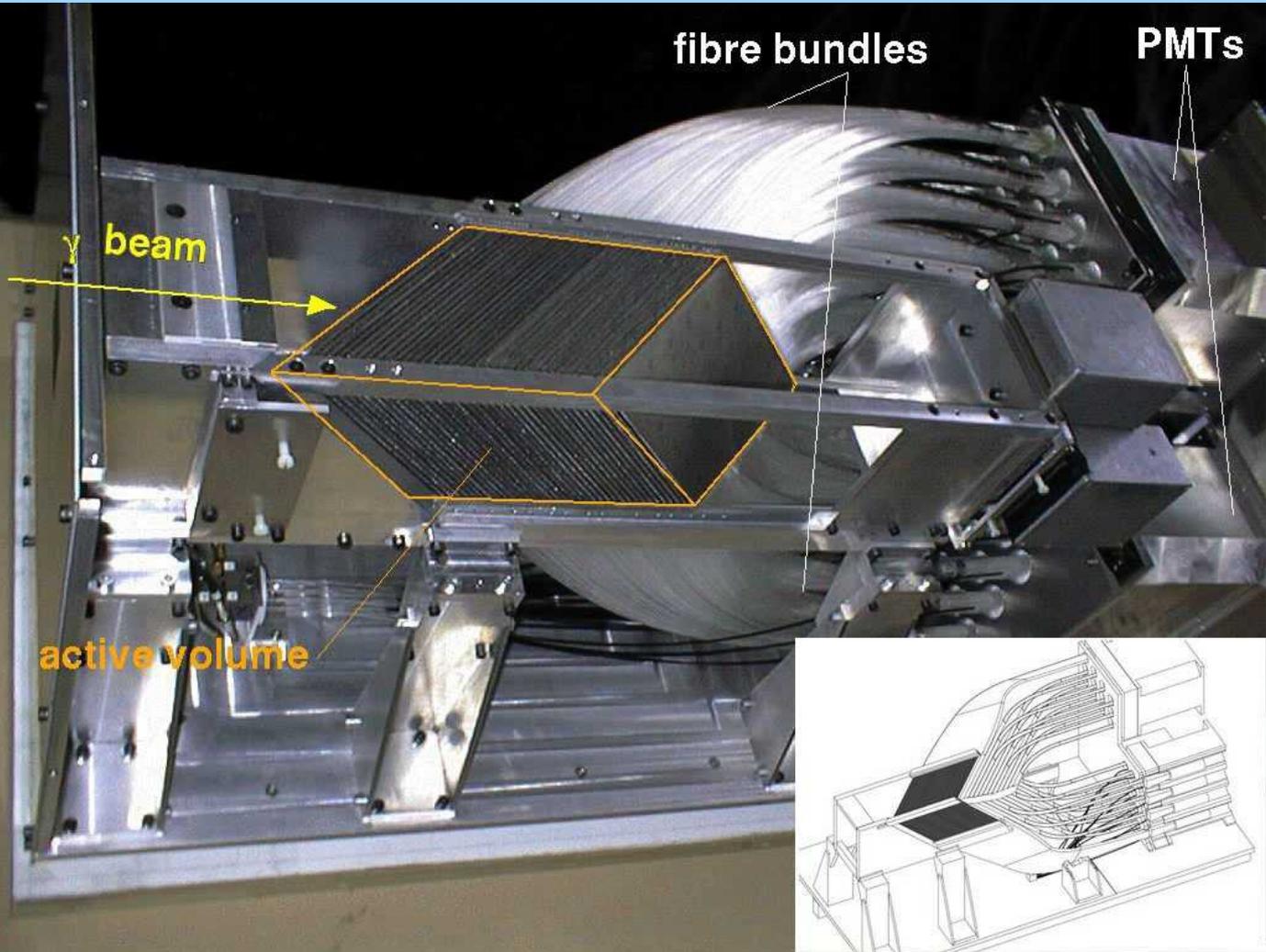
MET fits

ATLAS using super cluster  $\rightarrow 37\% / \sqrt{\Sigma E}$

CMS using Part. FLow  $\rightarrow 45\% / \sqrt{\Sigma E}$

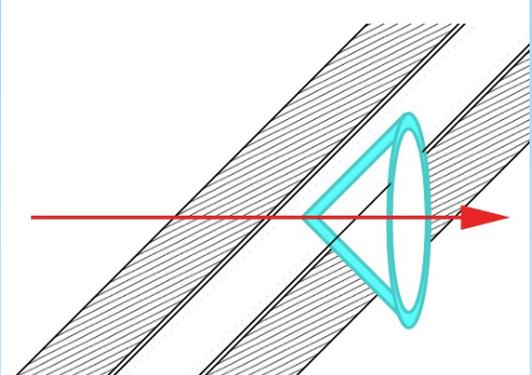
# Des calorimètres Čerenkov

# Luminomètre de H1



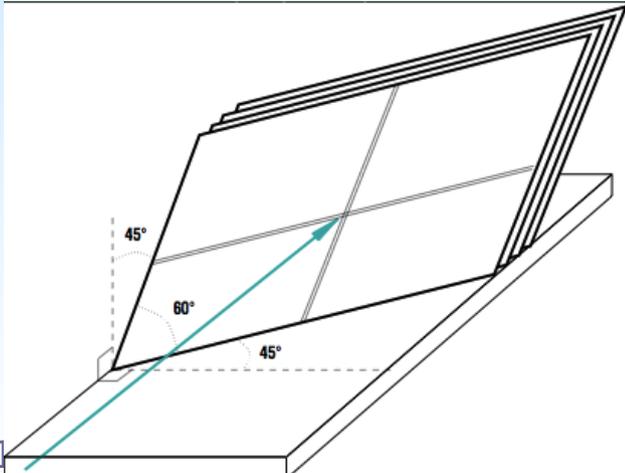
## ■ Hodoscope à $\gamma$

- ▶ Angle fixé

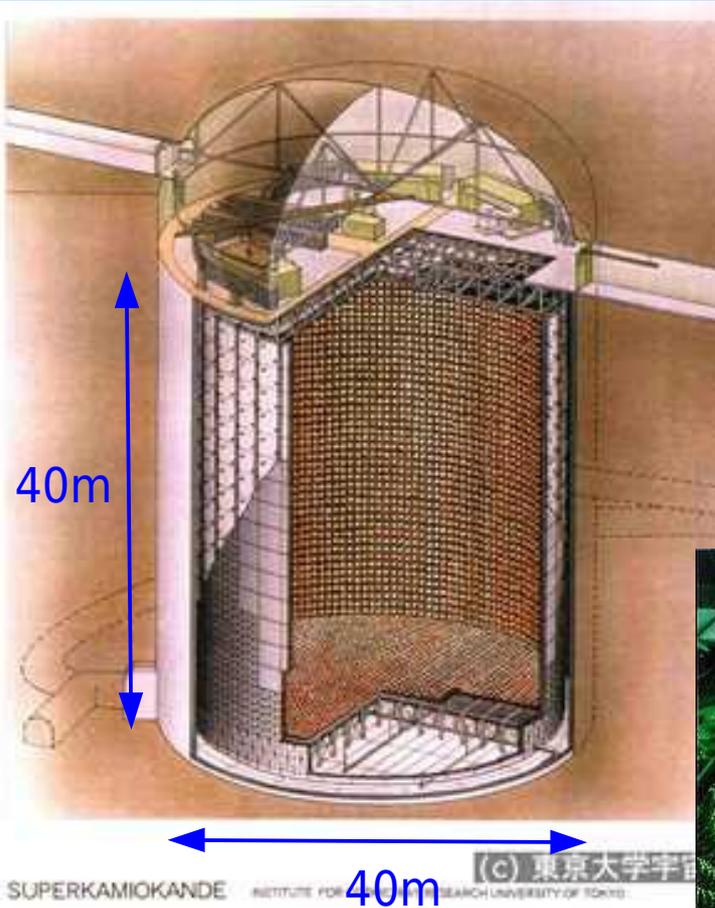


- ▶ Fibre de Quartz
- ▶ Sensibilité

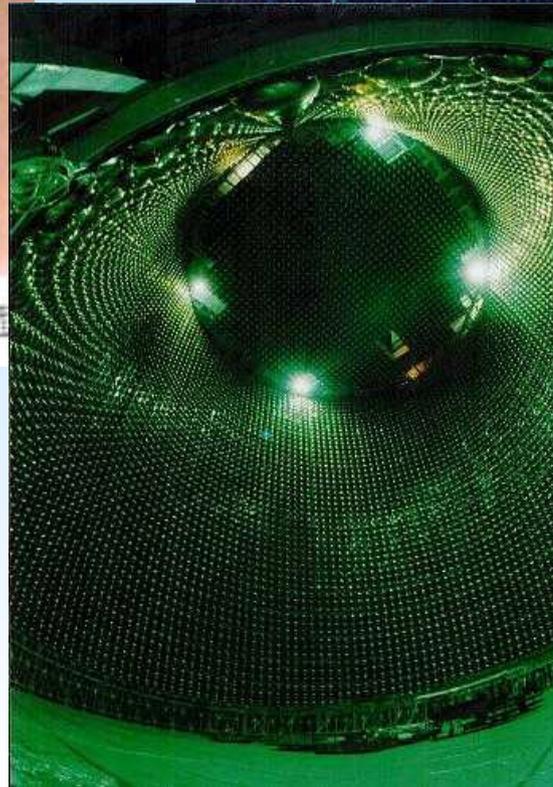
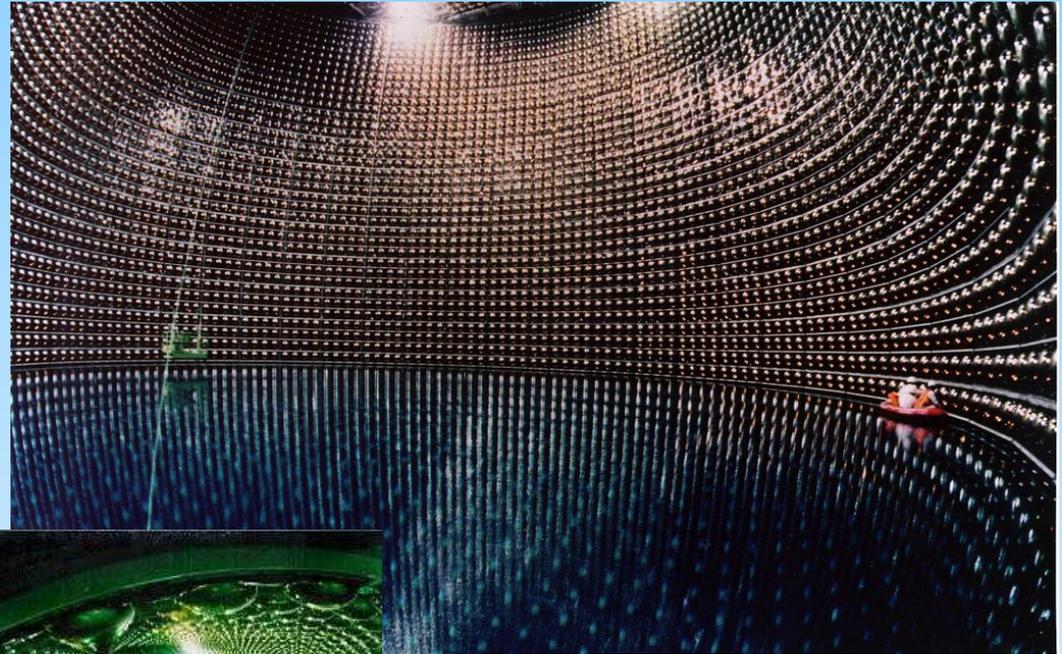
- ◆ Cœur de gerbe
- ◆ + 1 partie du halo



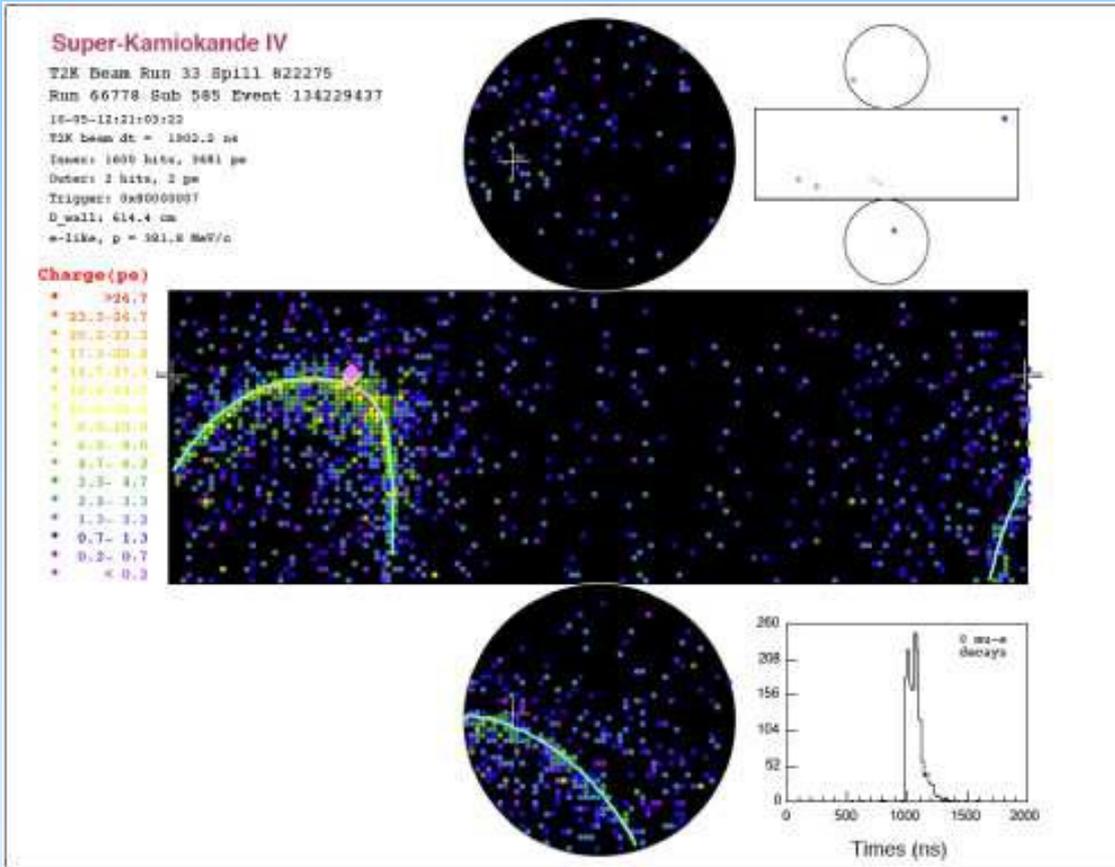
# neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



50 kt eau pure  
12000 PMTs  
(remplacés 1 fois)



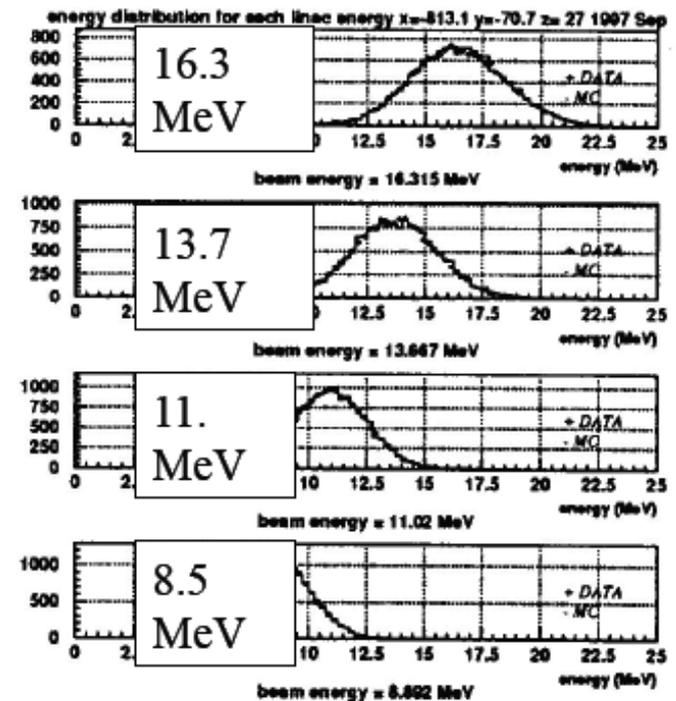
# neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



1 événement d'apparition  
d'électron

$\sigma(E)/E = 2.5\%$  (for 1GeV)  
to 16% (for 10MeV)  
Energy threshold : 5 MeV

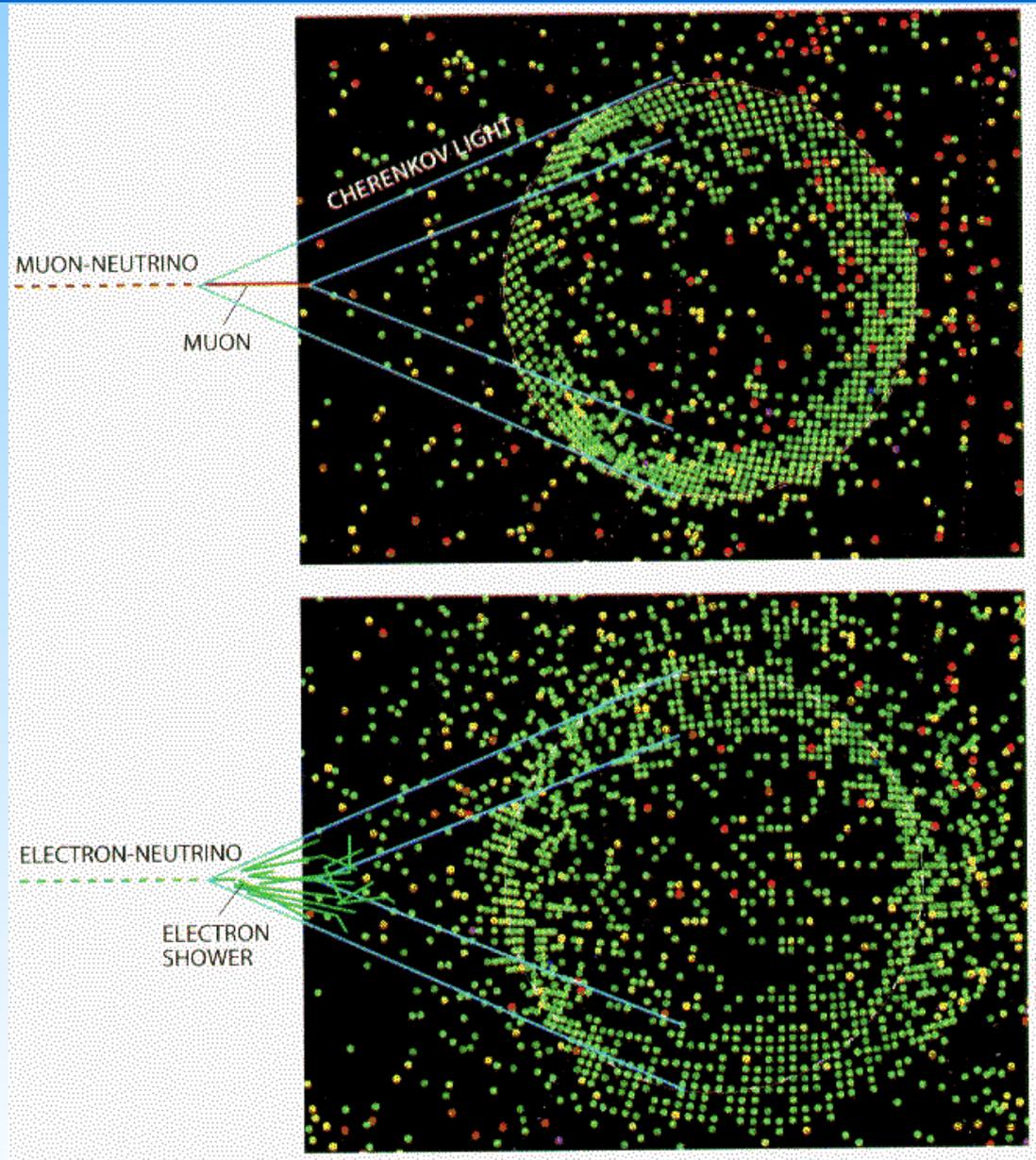
Uniformity and stability of response vs  
position and time to  $\pm 0.5\%$   
to avoid distortions in measured spectrum.



LINAC: injects electrons of 7 different  
energies at 6 different positions

# Super-K

## Identification de particules



**Bonus...**  
**Après — avant construction**

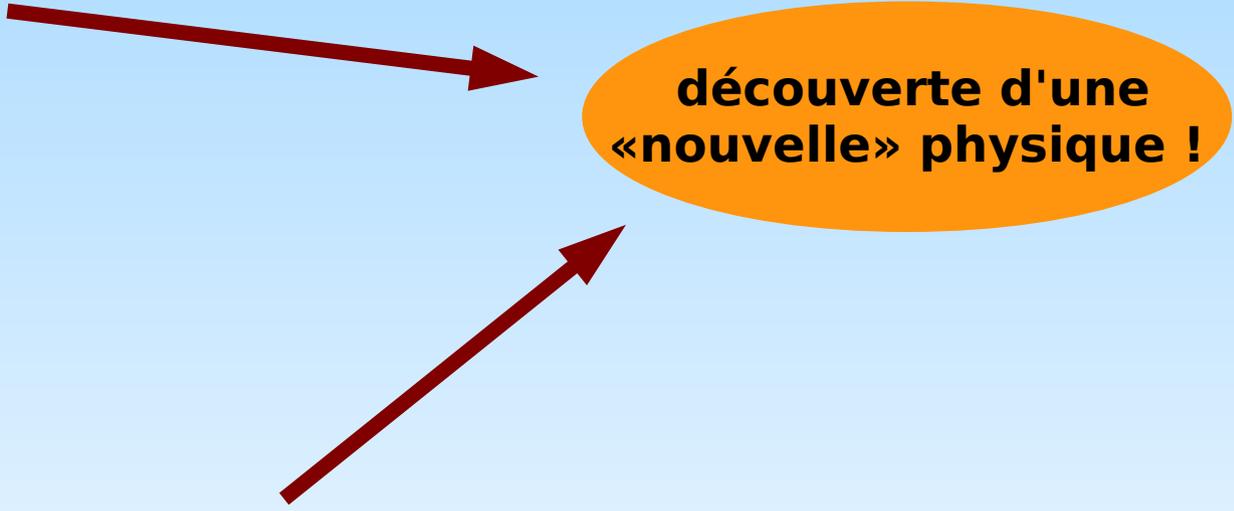
# Quelques effets «annexes»

- Texas tower

- ▶ Réponse disproportionnée à des neutrons
  - ◆ neutron  $\sim$  MeV dans le senseur, localisé
    - collision élastique n-p
  - ◆  $\rightarrow$  signal  $\sim$  GeV
- ▶ Vu dans les détecteurs gazeux ( $\Rightarrow$  Hydrogène)
- ▶ Vu dans les APD de CMS (pbm de triggers)

- Rupture de gain

- ▶ Electronique multi-gain
- ▶ ⚠ intercalibration  $\rightarrow$  apparition de pics !



**découverte d'une  
«nouvelle» physique !**

# Quelques considérations pour les ingénieurs (mais pas uniquement!)

- La mécanique :  
«le calorimètre volant» (en simu)
  - ▶ Zone mortes
  - ▶ déformations / précision
- L'électronique
  - ▶ La consommation (power pulsing)
  - ▶ La dissipation thermique
  - ▶ les CEM, mise à la masse
- La fiabilité sur 10-20 ans
  - ▶ Usure...
  - ▶ Accessibilité
- Les services
  - ▶ passage des services
  - ▶ l'intégration
- L'acquisition
  - ▶ Flux de données
  - ▶ Redondance
- L'intégration
  - ▶ Coûts
  - ▶ Risques :
    - ◆ la dépendance à 1 fournisseur
    - ◆ obsolescence du matériel : déjà vieux à l'installation